



DE PHYSIQUE

TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

GÉNÉRALE ET MÉDICALE.

TOME PREMIER.

LIBRAIRIE DE GERMER BAILLIÈRE.

ÉLÉMENS DE PHYSIQUE à l'usage des élèves de philosophie; par C. C. PERSON, docteur en médecine, docteur ès-sciences, agrégé de l'Université et de la Faculté de médecine de Paris, professeur de physique du collége et de la ville de Rouen. 1836-1837, 2 vol. in-8, fig. 10 fr.

COURS DE CHIMIE ÉLÉMENTAIRE avec ses principales applications aux arts et à la médecine; par A. BOUCHARDAT, pharmacien en chef de l'Hôtel-Dieu de Paris, agrégé de la Faculté de médecine de Paris, 2 vol. in-8, avec 4 planches représentant les instrumens de chimie. 9 fr.

NOUVEAUX ÉLÉMENS D'HISTOIRE NATURELLE, comprenant la zoologie, la botanique, la minéralogie et la géologie, un fort volume grand in-18, de 970 pages, avec 44 planches gravées sur acier, et représentant 400 sujets; par A. SALACROUX, docteur en médecine de la Faculté de Paris, professeur d'histoire naturelle au collége royal St-Louis, membre de la Société des sciences naturelles de France. (*Ouvrage adopté par le Conseil royal de l'Université pour l'enseignement de l'histoire naturelle dans les colléges et écoles normales primaires*). 1836. 7 fr.

PETITES CHIMIE ET BOTANIQUE DES ÉCOLES, ou Notions élémentaires de ces deux sciences; par un professeur, ancien élève de l'École polytechnique. Paris, 1835. 1 vol in-18. 1 fr. 50 c.

COURS DE PHARMACOLOGIE ou Traité élémentaire d'histoire naturelle médicale, de pharmacie, de thérapeutique, suivi de l'art de formuler, par M. F. FOY, docteur en médecine et pharmacien en chef des hôpitaux de Paris. 1831. 2 forts vol. in-8. 16 fr.

MANUEL DE PHARMACIE, théorique et pratique, contenant la récolte, la dessiccation, la conservation, l'extraction et la préparation de toutes les substances médicamenteuses, par F. FOY, docteur en médecine et pharmacien en chef des hôpitaux de Paris, 1838. 1 fort vol. in-18 avec fig. 3 fr. 50 c.

NOUVEAU FORMULAIRE DES PRATICIENS, contenant les formules des hôpitaux civils et militaires de Paris, de la France, de l'Italie, de l'Allemagne, de l'Angleterre, de la Russie, de la Pologne, etc., par F. FOY, docteur en médecine et pharmacien en chef des hôpitaux de Paris, 1837, 1 beau vol. in-18, imprimé sur papier vélin. 3 fr. 50 c.

MANUEL COMPLET DU BACCALAURÉAT ÈS-SCIENCES PHYSIQUES ET MATHÉMATIQUES, rédigé d'après le programme de l'Université et contenant l'arithmétique, la géométrie, la trigonométrie rectiligne, la trigonométrie sphérique, l'algèbre, la géométrie analytique, les élémens de statique, la physique, la chimie, la zoologie, la botanique, la minéralogie et la géologie, par G. AIMÉ, docteur ès sciences, ancien élève de l'École normale de Paris, et A. BOUCHARDAT, docteur en médecine et agrégé de la Faculté de Paris, pharmacien en chef de l'Hôtel-Dieu, 1838, 1 vol. gr. in-18 de 750 p. avec fig. 6 fr.

TRAITÉ DE PETITE CHIRURGIE, contenant l'art des pansemens, les médicamens topiques, les bandages, les vésicatoires, les cautérisations, les opérations simples, la saignée, les incisions, les ponctions, la vaccination, le cathétérisme, la réduction des hernies, les plaies simples, les brûlures, les ulcères, les abcès, les hémorrhagies, etc., par BOURGERY, docteur en médecine de la Faculté de Paris, 1835. 1 vol. in-8 de 534 pages. 6 fr.

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE

DE PHYSIQUE

GÉNÉRALE ET MÉDICALE

PAR PELLETAN,

Docteur en médecine, Professeur de Physique à la Faculté de Médecine de Paris,
Chevalier de l'Ordre royal de la Légion-d'Honneur,
Membre de plusieurs Sociétés savantes, françaises et étrangères.

TROISIEME ÉDITION,

REVUE, CORRIGÉE ET AUGMENTÉE.

Avec des Planches en taille-douce.

TOME PREMIER.

PARIS

GERMER BAILLIÈRE, LIBRAIRE-ÉDITEUR,

17, RUE DE L'ÉCOLE-DE-MÉDECINE.

LYON,
SAVY, 4, quai des Célestins.

LONDRES,
J.-B. BAILLIÈRE, 219, Regent-Street.

MONTPELLIER,
CASTEL et SEVALLE, libraires.

STRASBOURG,
DERIVAUX et LEVRAULT.

1838

IMPRIMERIE ET FONDERIE DE FÉLIX LOCQUIN,
16, RUE NOTRE-DAME-DES-VICTOIRES.

INTRODUCTION.

Dans les considérations qui se trouvent à la tète de la première édition de cet ouvrage, nous nous étions proposé de traiter la question de savoir si l'on pouvait regarder, dans la rigueur des termes, la Physique comme une science. Nous avions déduit de l'exposé des faits, qu'on pouvait plutôt la considérer comme une réunion de plusieurs parties des connaissances naturelles plus ou moins bien groupées, et possédant à divers degrés le véritable caractère scientifique qui réside principalement dans l'arrangement systématique et dans la dépendance d'une ou d'un certain nombre de lois bien constatées.

Aujourd'hui, les circonstances exigeant une troisième édition d'un livre dont nous avons dû méditer long-temps les améliorations, en profitant des critiques qui en ont été faites, nous sentons le besoin de nous justifier d'avoir conservé la même méthode, et fait comme autrefois dépendre toutes les notions physiques de considérations mécaniques.

C'est une opinion assez généralement répandue que la mécanique est une branche des connaissances naturelles, devenue tout-à-fait mathématique et complètement étrangère à la physique proprement dite. On a même rejeté de plusieurs traités de physique toutes notions de ce genre; mais bientôt néanmoins, sentant le vide et l'absence de principes que laissait une pareille division, les auteurs de traités

de physique en sont revenus à exposer en quelques pages, d'une manière extrêmement superficielle, quelques principes de mécanique avant d'entrer dans ce qu'ils regardent comme leur sujet propre.

Nous avouons qu'il nous est impossible de concevoir une distinction de cette nature, et nous demanderions volontiers à ses partisans quel est le phénomène de physique qui ne se réduit point à une question de mécanique, et quel est en mécanique le fait qui ne mérite pas le nom de phénomène physique. Si l'on veut parler de l'analyse appliquée aux lois du mouvement, nous répondrons qu'elle l'a été avec succès à la chaleur, à la lumière et à l'électricité elle-même, en sorte que presque toutes les notions précises que nous possédons sur ce qu'on nomme les fluides impondérables sont de véritables questions de mécanique, et qu'il n'existerait plus de physique proprement dite, si on en retranchait ce qui est mécanique.

Loin de considérer la mécanique comme étrangère à la physique, nous avons adopté l'opinion et le principe directement opposés; nous pensons que tout ce que nous possédons de notions positives en physique se réduit à de la mécanique pure, et voici nos raisons :

La mécanique est la science des lois du mouvement et de l'équilibre. La physique, comme nous l'entendons, est l'étude de tous les phénomènes qui peuvent être directement accessibles aux sens, et plus ou moins susceptibles de mesure : or, nous

disons que tout phénomène se résout nécessairement en un mouvement d'une nature quelconque qui en est l'essence. En effet, les phénomènes attribués au calorique, dilatation, condensation, changement d'état, etc., ceux attribués à la lumière, émission ou ondulation, réflexion, réfraction, diffraction, polarisation, etc., les phénomènes électriques, la tension, la fulguration, les attraction et répulsion; les effets des courans, etc., sont évidemment, sans discussion possible, des effets directement accessibles aux sens, mesurables, mesurés et même calculés; ils sont tous attribués à des forces, ils consistent tous en des mouvemens, ils constituent de la mécanique.

Si l'on objecte que la physique s'occupe de ce que l'on nomme des propriétés des corps, comme la solidité, la liquidité, l'élasticité, la porosité, la dureté, etc., nous répondrons que cette expression de propriété des corps fournit une idée complètement fausse, si elle indique dans le corps quelque chose de particulier qui soit la cause des effets que l'on observe; que ces prétendues propriétés ne paraissent jamais ou ne sont mises en jeu que par des mouvemens résultant de l'emploi de puissances diverses qui concourent, se combattent ou se mettent en équilibre. Qu'est-ce, en effet, que l'élasticité d'un gaz, si ce n'est la force avec laquelle il résiste à une pression qu'on exerce sur lui, et avec laquelle il revient à son premier volume quand il cesse d'être comprimé? Qu'est-ce que la tension d'un gaz, si ce n'est la force répulsive avec laquelle ses molécules tendent à s'écar-

ter? Qu'y a-t-il, en un mot, de plus mécanique que la loi de Mariotte?

Si l'on veut constater ce qu'on nomme les propriétés d'un corps, il n'existe rien à faire que d'appliquer à ce corps certaines forces connues dans leur nature et dans leur intensité, pour observer comment les forces qui résident dans le corps lui-même joueront le rôle de résistance. On a même à constater le plus communément l'état d'équilibre de ces puissances opposées; c'est ainsi que les divers degrés de dilatation des corps solides ou liquides ne sont que des états d'équilibre momentanés entre la force de cohésion et la force répulsive attribuée au calorique.

On peut aller plus loin, et dire que les prétendus fluides impondérables n'ont aucune existence démontrée, et que les noms qu'on leur donne ne représentent que des *forces*, ou *puissances*, dont on observe les effets et dont on recherche les lois.

C'est peut-être en chimie seulement qu'il pourrait être permis d'admettre des questions de phénomènes, et des désignations de propriétés, qui sembleraient, au premier coup d'œil, étrangères aux lois du mouvement, et néanmoins il est impossible d'entendre un seul fait de combinaison sans admettre un rapprochement plus grand entre les molécules hétérogènes qui se combinent, qu'entre les molécules similaires qui n'étaient rapprochées que par la cohésion, et le célèbre auteur du premier ouvrage français qui ait traité philosophiquement la chimie, a suffisamment

justifié notre opinion en intitulant son livre *Statique chimique*.

Quelques phénomènes, il est vrai, échappent encore à l'application des lois de la mécanique; et depuis que de Laplace a rangé sous ces lois les actions capillaires, on a découvert l'Endosmose; mais doit-on dire qu'un semblable effet n'est pas de la mécanique, parce qu'on ignore encore la nature de la force qui le produit?

S'il est vrai que tous les phénomènes de la nature soient, au fond, du mouvement produit par des forces agissant sur de la matière, non seulement on ne doit pas séparer la mécanique de la physique, mais encore la première doit servir de base à la seconde. Les faits de celle-ci doivent se ranger sous les lois de la première, et la physique ne saurait avoir d'autre méthode, d'autre cadre, d'autre enchainement d'idées que la mécanique elle-même.

C'est d'après ces principes que nous avons adopté l'ordre qui présidait à la première édition de ce livre, et qui préside encore à celle-ci.

Une autre idée fort répandue, et nous pourrions dire presque générale parmi les médecins, assigne des limites fort étroites aux applications possibles de la physique à l'étude de l'économie animale. Il semble à la plupart des hommes qu'après la théorie des leviers et la connaissance du poids de l'air, il n'y a plus d'application importante à faire de l'une des deux sciences à l'autre.

Comme nous pensons, au contraire, que ces ap-

plications sagement faites sont la plus solide de toutes les bases sur lesquelles puisse reposer la science médicale, nous entrerons à ce sujet dans quelques détails que nous désirons voir méditer avec soin par les jeunes gens qui débutent dans la carrière.

On peut établir, en général, que les applications d'une science à une autre sont de deux ordres : 1° des applications de principes, de méthodes de raisonnement, nous les appellerons volontiers applications philosophiques d'une science à l'autre ; 2° des applications de faits qui consistent à découvrir quels sont les phénomènes dépendans de la science appliquée, qui se retrouvent dans la science à laquelle on l'applique. Nous examinerons successivement ces deux modes d'application de la physique aux sciences médicales.

On nomme philosophie d'une science, l'ensemble des principes généraux qu'elle présente, et même la méthode qui a été suivie pour les découvrir.

Si différentes sciences sont arrivées à différens degrés de perfectionnement, il y a de grandes probabilités que la science qui a fait le plus de progrès est celle pour laquelle les hommes ont adopté une meilleure manière de philosopher.

S'il est question d'appliquer la méthode d'une science à une autre, il faudra sans contredit préférer la méthode de la science la plus avancée pour la reporter dans celle qui l'est moins.

Une science approche d'autant plus de la perfection permise à l'esprit humain, que les faits qui la

composent s'enchaînent suivant un plus petit nombre de lois, et s'expliquent avec le plus petit nombre de de suppositions.

Sous les deux points de vue précédens, la physique est certainement, de toutes les connaissances humaine, celle qui a fait le plus de progrès; il devient très probable que la manière de philosopher qui a présidé à ces progrès était la meilleure. Nous disons que la physique est arrivée à un haut degré de perfectionnement, et en effet, les lois de la plupart des phénomènes sont si bien déterminées, que ceux-ci sont devenus calculables et peuvent être prévus avec certitude. Les suppositions qui servent aujourd'hui à comprendre ou à expliquer presque tous les phénomènes physiques sont en bien petit nombre; l'attraction, le calorique, la lumière et l'électricité suffisent pour concevoir toute la nature inorganique.

Si donc il est une branche des sciences naturelles qui ait acquis le droit d'imposer sa méthode aux autres parties de ce grand tout, c'est sans contredit la physique, et principalement à l'égard de la physiologie, cette prérogative ne saurait lui être refusée.

Quelle est donc la philosophie de cette science physique, qui a si bien réussi à ceux qui l'ont employée, et que nous désirons voir introduire dans la science de la vie?

Avant Newton, la manière de raisonner des physiciens était bien vague et bien incertaine; des suppositions gratuites et multipliées, des *propriétés occultes*, attribuées arbitrairement aux corps pour expliquer

les phénomènes qu'ils présentaient, avaient donné naissance aux tourbillons et à une foule d'autres idées du même ordre.

Newton est arrivé, et il a dit : *On a rendu un grand service aux sciences, lorsqu'en supposant un petit nombre de principes ou de causes d'actions, dût-on ne jamais connaître la nature de ces causes, on parvient ainsi à expliquer un grand nombre de phénomènes naturels.*

Newton a joint l'exemple au précepte; il *a supposé* l'existence d'une force tendant à rapprocher les particules de la matière, et s'exerçant en raison directe des masses et inverse du carré des distances; *cette supposition* est devenue pour ses successeurs la loi la plus générale de la nature.

Ainsi, la méthode de philosopher en physique consiste aujourd'hui, lorsqu'on rencontre un certain nombre de faits qui ne paraissent pas susceptibles de s'expliquer à l'aide des suppositions déjà introduites dans la philosophie naturelle, à admettre l'existence d'une nouvelle cause d'action, à laquelle on attribue le mode ou la loi qui satisfait le mieux à l'ensemble des faits.

On voit que, depuis Newton, les physiciens et les mathématiciens n'ont point dérogé à ce principe. On a expliqué la polarisation de l'aimant par l'existence de deux fluides magnétiques s'attirant et se repoussant; on a expliqué les phénomènes électriques par l'existence de deux fluides exerçant l'un sur l'autre le même genre d'action. Quand on a découvert

l'existence de courans galvaniques et des singuliers phénomènes qu'ils présentent, on a admis une *force électro-motrice*, dont les applications s'étendent tous les jours, et qui deviendra peut-être avec le temps la loi la plus générale de la nature, peut-être même la cause de l'attraction.

Il faut convenir que si l'on compare la manière de philosopher de la plupart des physiologistes modernes avec cette méthode newtonienne dont M. Biot a fait l'épigraphe de son livre, on a lieu de s'étonner que des principes repoussés depuis si long-temps de toutes les sciences exactes aient trouvé leur refuge dans cette belle science de la vie, si vaste, si difficile, et qu'on ne devrait aborder qu'avec des méthodes mûries et consacrées par l'expérience.

Newton condamnait les propriétés occultes comme des suppositions vaines et nuisibles à la science. La plupart des physiologistes prétendent que la cause des fonctions ou des *mouvemens* organiques est dans l'organisation même, sans pouvoir toutefois démontrer ni même indiquer comment et en quoi consiste cette organisation, qui peut produire de tels effets. Ils ne sont point arrêtés en voyant des organes qui semblent en bon état de structure, et qui n'agissent pas ou agissent mal; en en voyant d'autres, dont la structure est évidemment altérée, et qui continuent à agir régulièrement. Plutôt que de renoncer à leur méthode, ils aiment mieux supposer que dans le premier cas les altérations organiques ne sont pas visibles, et que dans le second elles ne sont qu'ap-

parentes. Toute cette philosophie repose évidemment sur les propriétés occultes depuis si long-temps condamnées et bannies des sciences exactes.

Le motif plausible de ces physiologistes consiste à ne vouloir admettre que ce dont ils acquièrent la conscience par leurs sens, ils ne s'aperçoivent point qu'ils sont aussi incapables de voir l'organisation intime de nos organes, que la force ou la puissance à laquelle ils attribueraient leur action, en suivant la méthode de Newton; que, par conséquent, leur explication n'a rien, en réalité, de plus accessible aux sens, tandis qu'elle a l'immense désavantage de ne produire qu'une explication vaine, de ne conduire à aucune généralisation, et de s'opposer même à la découverte d'aucune loi importante de la vie.

Notre Bichat, malgré les erreurs assez fréquentes d'un esprit trop jeune et trop peu nourri de connaissances exactes, avait mieux saisi que ses successeurs la vraie philosophie naturelle de la science de la vie; il admettait des forces, il en recherchait les lois : si ses suppositions étaient trop nombreuses, si la détermination de ses lois était encore incertaine ou inexacte, le temps aurait perfectionné cette ébauche systématique : on a tout détruit en la renversant.

Nous établissons donc que le premier et le plus grand service que la physique puisse rendre aux sciences médicales est, sans contredit, de porter dans l'étude de la vie la méthode de Newton pour la préserver de cette foule d'aberrations, conséquences nécessaires d'une mauvaise méthode de philosopher.

Les applications de faits que la physique peut fournir aux sciences médicales, loin d'être limitées, comme on le pense, à un petit nombre d'objets, sont aussi nombreuses que les phénomènes de la vie, en y comprenant toutes les modifications que des agens extérieurs peuvent produire.

Cette proposition, qui peut paraître exagérée au premier aspect, est cependant rigoureusement vraie, comme nous allons le démontrer.

La matière, lorsquelle commence à faire partie d'un être vivant, contracte, il est vrai, des propriétés particulières; elle obéira désormais à des lois qui sont étrangères aux corps bruts; mais pour avoir acquis ces propriétés, pour se trouver sous l'influence de ces lois, elle n'a rien perdu de ce qu'elle possédait, et n'est soustraite à aucune des influences qui régissent la matière inorganique. On n'a jamais pensé à dire qu'un kilogramme de matière inorganique cessait de peser un kilogramme, en entrant dans une économie vivante. Ainsi, le phénomène général de l'attraction subsiste sans altération. Le calorique dilate les corps organisés et volatilise leurs fluides comme si ces matières n'étaient pas organisées. Il en est de même de toutes les propriétés particulières; un muscle ne cesse pas d'être *élastique* parce qu'il est *contractile*; un homme peut être électrisé comme un conducteur métallique, et ses cheveux font rigoureusement l'office de pointes pour la déperdition de ce fluide.

S'il est vrai qu'en outre des propriétés vitales ou

organiques, suivant qu'on voudra les nommer, la matière des êtres vivans conserve toutes les propriétés de la matière brute, il en résultera nécessairement que tous les phénomènes que présenteront ces êtres vivans seront le résultat de la double influence de ces deux ordres de causes; que pas un seul de ces phénomènes ne pourra être bien compris en faisant abstraction des lois vitales, et que réciproquement aucun ne saurait être expliqué sans tenir compte des lois qui régissent la matière inorganique.

Pour employer ici une expression tirée de la mécanique elle-même, nous dirons que chaque phénomène de la vie s'exécute, en quelque sorte, suivant la diagonale d'un parallélogramme dont les forces vitales et les puissances inorganiques représentent les deux côtés.

Abandonnant cette manière générale de considérer les applications de la physique aux sciences médicales, nous trouverons une multitude de cas particuliers où cette application est tellement indispensable, que, faute de l'avoir pratiquée avec connaissance de cause, de grandes erreurs ont été accréditées et répétées sans opposition.

On a dit que les exhalations internes se faisaient sous forme de vapeurs, faute de bien connaître les lois et les conditions de l'existence de ces sortes de fluides élastiques, ou parce qu'on a supposé faussement que les conditions de la formation des vapeurs différaient, dans un corps vivant, de ce qu'elles sont dans un corps brut.

On a souvent parlé des mouvemens du cerveau dans le crâne, faute d'avoir reconnu que ce viscère est incessamment comprimé du dedans au dehors, par la pesanteur de l'atmosphère et l'impulsion du cœur dont les effets lui sont transmis par des colonnes fluides, tandis qu'à l'extérieur il est défendu de toute espèce de pression.

On s'est servi des courbures artérielles pour expliquer une prétendue diminution dans l'impulsion du sang, sans considérer les lois de l'écoulement d'un liquide dans un canal courbe.

On a vainement cherché l'explication du phénomène du pouls, pour ne s'être point servi de la théorie du choc des liquides sur les parois des canaux qui les conduisent.

On a fait de fausses applications de la capillarité à l'absorption, pour avoir négligé les conditions essentielles de l'action capillaire.

On a mal calculé les forces du cœur par une erreur d'hydrostatique; on a supposé sa dilatation active, pour n'avoir pas tenu compte de son élasticité; enfin nous pourrions citer un grand nombre d'erreurs dépendantes de fausses applications, mais un nombre encore bien plus considérable de cas dans lesquels ces applications n'ont jamais été tentées.

On remarquera sans doute que nous n'avons cité jusqu'ici aucun cas de mécanique animale proprement dite. Ce genre d'application est considéré comme tout à fait vulgaire, quoiqu'il soit, en effet,

demeuré jusqu'ici bien incomplet et souvent bien inexact.

Concluons donc que, si la philosophie naturelle offre un appui si nécessaire aux sciences médicales, quant à la recherche des lois générales, la physique ne leur est pas moins indispensable pour l'étude et l'explication de tous les faits particuliers.

Nous ne ferions que répéter ce qui a déjà été dit dans tous les livres élémentaires, en parlant des applications de la physique à l'hygiène publique ou privée et à la médecine légale.

Il nous reste à indiquer en quoi l'édition actuelle de ce traité diffère de la première et de la seconde.

Nous avons d'abord mis tous nos soins à faire disparaître les erreurs qui ont pu être reconnues par nous-même ou par nos critiques; nous nous sommes attaché à rendre plus clair et à développer davantage tout ce qui nous a paru obscur ou incomplet; mais, en outre, nous avons introduit dans le cours du traité un certain nombre de travaux particuliers, résultats de nos études constantes, et qui auraient pu faire l'objet de mémoires isolés.

Dans le travail difficile de faire comprendre clairement, sans faire un trop fréquent usage des formules et du langage de l'analyse, les faits principaux que la physique possède, nous avons redoublé d'efforts pour nous mettre à la portée de toutes les intelligences, en restant au niveau de la science.

Nous avons donné une extension convenable au livre de l'électricité et du galvanisme, et nous avons

spécialement développé les lois de l'électro-dynamie, qui nous paraît destinée à exercer la plus grande influence sur la science de la nature en général, et sur la physiologie en particulier.

Nous avons cessé de présenter la théorie de la lumière sous la double supposition de l'émission et des ondulations d'un éther préexistant, pour adopter ce dernier système, qui nous paraît seul propre à expliquer les faits nombreux que la science possède.

Quant aux rapports de la physique à la science de l'homme, nous nous sommes attaché d'abord à signaler toutes les applications d'une science à l'autre, c'est-à-dire à montrer quel est le degré d'influence des lois physiques dans les phénomènes de la vie. Nous n'avons fait que développer ainsi la pensée qui a présidé à toute notre carrière scientifique depuis notre thèse de réception au doctorat (Paris.....) qui portait ce titre :

Du degré d'influence des lois physiques et chimiques dans les phénomènes de la vie.

Nous nous sommes ensuite attaché à combattre un grand nombre de fausses applications qui ont été et qui sont encore faites chaque jour, soit par un défaut de connaissances suffisantes en physique, soit faute de sévérité et de précision dans la méthode. Nous regardons ces fausses applications comme une suite malheureuse de l'extrême facilité avec laquelle les physiologistes ont admis jusqu'à ce jour les interprétations hypothétiques, et nous croyons qu'elles

présentent en ce moment le plus grand danger que puisse courir la science de l'homme.

Enfin nous signalerons un certain nombre de points tout à fait nouveaux qui sont le résultat de nos recherches et qui ne se trouvent encore dans aucun traité de physique ou de physiologie.

Sous les numéros 169 à 176, nous avons traité d'une manière tout à fait nouvelle les principales questions des mouvemens de l'homme; nous avons donné la théorie de l'art de boxer et la théorie de l'action de lancer des projectiles; nous avons analysé plus exactement les élémens de la marche et de la course; nous avons distingué le saut en deux espèces, le saut tangentiel, et le saut vertical; nous avons donné la première théorie exacte du saut vertical en tenant compte des masses et des quantités de mouvement, et nous avons rendu exactement compte de tous les problèmes de cet ordre qui embarrassaient Borelli et Barthez. Enfin nous avons démontré ce fait nouveau, que la contraction musculaire n'est point instantanée, qu'elle a une vitesse propre, limitée et variable dans les divers animaux; nous avons prouvé que la hauteur possible du saut dépend uniquement de la vitesse de la contraction musculaire et non de son intensité, comme on l'a enseigné jusqu'ici. A l'aide enfin de ce principe nouveau, nous avons combattu plusieurs préjugés et donné l'explication de plusieurs faits restés sans interprétation.

Nous avons, dès les premières éditions de ce livre, donné la théorie sommaire des curieux phénomènes

que produit sur le billard l'usage de ce que l'on nomme la *queue à procédé*, théorie qui depuis a fait le sujet d'un savant ouvrage; nous osons à peine espérer que notre essai ait fourni l'idée du traité.

A l'occasion du choc des liquides, nous avons donné la seule théorie rationnelle du pouls.

Sous les numéros 216 et suivans, nous avons traité de l'action du cœur sur le sang, de la tension des voies circulatoires, du mouvement réel des fluides dans les vaisseaux, etc., et nous avons prouvé que les médecins ont tiré jusqu'ici des inductions physiologiques fausses de l'état du pouls.

Nous avons posé les principes qui doivent diriger le physiologiste dans l'application de la capillarité aux phénomènes de la vie, et fait apercevoir de quelle importance pourra devenir l'endosmose.

Au livre du calorique, nous avons traité avec soin de la chaleur animale, rectifié les idées relativement à la fixité de température et donné les résultats des expériences, mais nous avons prouvé que le poumon était le seul lieu possible de la production du calorique et la respiration sa seule cause, rendant compte par les lois chimiques de tout le calorique dégagé.

Nous avons ensuite distingué les effets du calorique dans les êtres vivans en ceux qui dépendent des courans et ceux qui dépendent de la température; nous avons prouvé que cette dernière n'est qu'un résultat fonctionnel variable et d'une importance secondaire, tandis que la vitesse des courans de chaleur est la véritable cause qui influe sur les phénomènes de la

vie, en sorte que nous sommes arrivés à cette proposition générale : *La vie n'existe que sous l'influence d'un courant de calorique.*

A l'article vapeur, nous avons présenté l'exposé et la théorie des nombreux phénomènes qui résultent des propriétés nouvelles que nous avons découvertes dans le jet de vapeur, en indiquant quelques unes des importantes applications qui en ont déjà été faites dans les arts. Nous avons donné des détails importans sur les divers combustibles et leur emploi, complétant en cela le Traité de M. Péclet, qui a omis les combustibles gazeux.

Au livre de l'électricité, nous avons produit des aperçus nouveaux sur l'action nerveuse dans ses rapports avec les appareils et les phénomènes galvaniques, et donné une théorie de *l'acupuncture*.

—

TABLE DES MATIÈRES

CONTENUES

DANS LE PREMIER VOLUME.

LIVRE PREMIER.

CHAPITRE PREMIER.

Notions préliminaires.

CHAPITRE II.

Notions générales du Mouvement, de l'Équilibre, et de leurs Lois.

CHAPITRE III.

Des Forces ou Puissances naturelles.

LIVRE SECOND.

Des Corps solides.

CHAPITRE PREMIER.

Des Propriétés générales de la Matière, considérées dans les Corps solides.

CHAPITRE II.

De l'Attraction dans les Corps solides.

CHAPITRE III.

Application des lois de la Mécanique à l'Equilibre et aux Mouvemens des Corps solides.

LIVRE TROISIÈME.

Des Corps liquides.

CHAPITRE PREMIER.

Des Propriétés générales de la matière, considérées dans les Corps liquides.

CHAPITRE II.

De l'Attraction dans les Corps liquides.

CHAPITRE III.

De l'Application des lois de la Mécanique à l'équilibre et aux mouvemens des Corps liquides.

LIVRE QUATRIÈME.

Des Fluides élastiques.

—

CHAPITRE PREMIER.

Propriétés générales de la Matière, considérées dans les fluides élastiques.

CHAPITRE II.

De l'Attraction dans les fluides élastiques.

CHAPITRE III.

Application des lois de la Mécanique à l'équilibre et au mouvement des fluides élastiques.

TRAITÉ
ÉLÉMENTAIRE
DE PHYSIQUE
GÉNÉRALE ET MÉDICALE.

LIVRE PREMIER.

—

CHAPITRE PREMIER.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES.

1. La Physique est cette partie des sciences naturelles qui s'occupe des phénomènes inorganiques accessibles aux sens, et des lois qui président à ces phénomènes.

Les mots *Science physique* signifient, dans le sens étymologique, Science de la nature. Mais cette Science a pris aujourd'hui une extension qu'elle était loin de posséder au temps où ces mots ont été consacrés; maintenant la connaissance de la nature se compose : 1°. de l'Histoire naturelle, qui classe et décrit les différens êtres; 2°. de la Physique, qui étudie les phénomènes sensibles des corps; 3°. de la Chimie, qui en étudie les actions intimes; 4°. de la Physiologie, qui étudie les phénomènes ou les fonctions des êtres vivans.

La Physique ne formant plus ainsi qu'une des branches

des sciences naturelles, et se bornant à l'examen des phénomènes accessibles aux sens, qui peuvent se passer dans les corps, embrasse cependant une immense étendue, et entretient des rapports intimes avec les autres branches des connaissances naturelles.

Pour bien entendre la définition de la physique, qui ne doit être que l'expression de son but, il est important de remarquer que la nature se compose de corps doués d'états divers, et animés de forces qui les font réagir les uns sur les autres : ces forces paraissent soumises à des lois immuables que le génie de l'homme a pu découvrir; en sorte que le physicien doit étudier les corps, observer les phénomènes, et calculer les effets d'après la connaissance des lois générales.

L'étude des corps peut être faite sous un grand nombre d'aspects différens. Le naturaliste voit principalement en eux les caractères qui peuvent servir à les distinguer et à les classer. Le chimiste s'occupe principalement de leur aptitude à produire telle ou telle action intime et réciproque; tous deux particularisent beaucoup leurs études et s'occupent surtout des espèces. Le physiologiste s'attache principalement à observer les êtres organisés et à bien connaître leur structure intérieure, d'ou dépendent leurs fonctions. Quant au physicien, il étudie plutôt la matière en général que les corps en particulier, parce que beaucoup de corps ont pour lui des propriétés communes importantes; il ne distingue les corps qu'en un certain nombre de grandes classes dont les propriétés diffèrent sensiblement. C'est ainsi que le physicien recherche la connaissance de la matière considérée en général, des corps solides, des corps liquides et des fluides aériformes, considérés en masse, tandis que l'or et le plomb, l'eau et l'acide sulfurique, l'oxigène et l'azote ne diffèrent à ses

yeux que sous les rapports de leur poids, de leur densité, deleur opacité, de leur transparence, etc.

L'observation des phénomènes est beaucoup plus simple et plus facile pour le physicien que pour ceux qui cultivent les autres branches des connaissances naturelles. En effet, les phénomènes de son ressort sont accessibles aux sens : le choc de deux corps, l'action d'un levier, l'écoulement d'un liquide, la dilatation d'un gaz, peuvent être observés directement, et l'intensité de l'action devient même susceptible d'une mesure mécanique. Il n'en est pas de même pour le chimiste ou le physiologiste, qui ont à étudier des phénomènes intimes dont ils ne peuvent juger que par les conséquences et qui se trouvent toujours plus ou moins compliqués.

Cette facilité de l'observation directe des phénomènes a donné lieu à l'invention d'un grand nombre de machines destinées à les reproduire à volonté ou même à les mesurer, et l'usage de ces machines a donné lui-même naissance à une sorte de physique spéciale, qui a été nommée *Physique expérimentale.* L'emploi de ces machines a pour avantage principal d'isoler les phénomènes et de les présenter dans des cas simples où il devient facile d'en apprécier les causes et d'en suivre les lois. Par exemple, le choc des corps est un des phénomènes les plus communs dans l'ordre naturel; mais tous ces cas naturels étant très-compliqués, on ne saurait s'en faire une idée bien exacte, qu'en déterminant ce choc entre des sphères de volumes et de poids connus, mises en mouvement par des forces appréciables. Nous ferons observer seulement ici que l'isolement absolu d'un phénomène physique est impossible, même avec les machines les mieux construites, et qu'il se rencontre toujours quelques circonstances, comme le frottement, la roideur des fils, etc., qui viennent modifier le résultat et l'empê-

chent de se trouver rigoureusement conforme à ce qu'il devrait être, d'après les lois générales connues; en sorte que les machines doivent être plutôt considérées comme un moyen de représentation sensible des phénomènes, que comme un moyen d'expression rigoureuse.

Une autre utilité fort remarquable des machines et dont on leur a tenu dans ces derniers temps trop peu de compte consiste à préserver la théorie de certains écarts dans lesquels les esprits sépculatifs sont sujets à l'entraîner : s'il arrivait, par exemple, qu'un mathématicien, partant d'une supposition probable sur le mode de mouvement des molécules des corps dans les cas de vibration, fût conduit par l'analyse à trouver qu'il se fait dans le choc des corps élastiques une perte du tiers ou de la moitié des forces vives, il suffirait de faire choquer deux billes d'ivoire pour démontrer la fausseté de sa théorie; dans ce choc, il y a bien une perte de mouvement, mais elle est très petite, et elle est évidemment subordonnée à des circonstances accessoires.

Au reste, les analyses chimiques ne sont pas, dans leur nature, beaucoup plus rigoureuses que les expériences de physique, et la théorie atomistique sert à rectifier leurs résultats, comme les autres lois générales de la nature servent à apprécier les effets produits par les machines nécessairement imparfaites dont le physicien fait usage.

Le physicien est encore plus heureux sous le rapport de l'étude des lois qui président aux phénomènes que pour l'observation du fait lui-même. Les phénomènes physiques s'enchaînent les uns aux autres, se renouvellent avec constance et régularité dans des circonstances semblables, et dès lors on a pu les attribuer à ce qu'on a nommé des propriétés de la matière, ou à des puissances naturelles, dont l'exercice régulier constitue ce qu'on a nommé des lois. Ces

lois se sont trouvées en petit nombre et tellement constantes qu'en les admettant on a pu soumettre au calcul presque tous les phénomènes physiques, et par conséquent les prévoir avec certitude dans des circonstances données. Par exemple, tous les corps qui sont à notre disposition tendent à s'approcher de la masse du globe terrestre; c'est ce que l'on attribue à une force que l'on nomme pesanteur. La chute des corps s'opère par un mouvement continuellement accéléré, qui leur fait parcourir dans des temps successifs des espaces qui sont comme les carrés de ces temps, ce qui constitue la loi; en sorte que de quelque hauteur et dans quelque circonstance qu'un corps quelconque vienne à tomber, le physicien peut toujours calculer et prévoir avec exactitude le temps que durera sa chute.

Les méthodes analytiques générales qui servent à exprimer en mathématique, par une seule formule, tous les cas possibles qui peuvent se rencontrer dans les rapports d'un certain nombre de quantités, ou même à y découvrir de nouveaux rapports, ont été appliqués avec un grand succès à représenter toutes les variétés que la différence des circonstances peut apporter dans la manifestation d'un phénomène physique. C'est ainsi que le calorique pénétrant, dans des temps connus, des longueurs déterminées de certains corps d'une nature et d'une forme particulières, on a pu, sur ces bases, arriver à une expression mathématique générale qui représente la marche du calorique dans tous les corps, quelles que soient leur nature et leurs propriétés.

On conçoit que ces méthodes mathématiques ont le très grand avantage, en généralisant ainsi un certain nombre de faits bien observés, de dispenser le physicien d'une multitude d'expériences particulières, et en outre de donner

à l'appréciation des phénomènes un degré d'exactitude que l'expérience elle-même ne saurait presque jamais offrir. Aussi, la physique, étudiée sous ce point de vue, et qu'on a nommée *Physique analytique*, a-t-elle joui d'un très grand crédit depuis l'époque du perfectionnement des méthodes scientifiques. On peut, en effet, obtenir avec un tube de verre et un bâton de cire à cacheter tous les phénomènes essentiels pour fonder la théorie entière de l'électricité, tous ceux qu'on obtient avec les machines destinées à cet usage pouvant être facilement prévus ou imaginés.

Cependant il faut convenir que peu d'hommes ont ou peuvent acquérir dans la position sociale où ils se trouvent des connaissances mathématiques assez profondes pour concevoir ainsi *à priori* la production des phénomènes, et que d'ailleurs les effets saillans que produisent les machines servent utilement à faire comprendre et à fixer dans la mémoire les points essentiels de la science.

Nous avons conclu des considérations précédentes que des élémens de physique particulièrement destinés aux élèves en médecine devaient contenir l'indication des expériences nombreuses que nous répétons dans nos leçons publiques, et que nous devions plutôt présenter les résultats généraux obtenus par des méthodes mathématiques que ces méthodes elles-mêmes, qui sont, entre les mains du physicien, le plus précieux des instrumens, mais qui ne sauraient être comprises par le plus grand nombre de nos lecteurs.

Il est facile d'imaginer que la physique proprement dite doit fournir de nombreuses applications aux sciences, aux arts et même aux besoins domestiques; mais la plus précieuse pour nous est celle que nous pouvons faire des lois de la physique générale, à un très grand nombre de phé-

nomènes de l'économie animale, qui, pour s'opérer dans un être organisé, et quoique soumis dans leurs causes à toute l'influence de la vie, n'en suivent pas moins dans leur marche les lois générales qui les régiraient dans un corps brut. C'est ainsi que, quoique la cause de contraction d'un muscle soit en dehors des connaissances physiques proprement dites, et soumise aux lois de la vie, étant donnée cette contraction, le muscle agira sur l'os auquel il s'attache, comme sur un levier inorganique, et le mettra en mouvement suivant les principes rigoureux de la mécanique.

C'est sous ce point de vue que nous qualifions ici la science de *Physique médicale*, en tant que nous indiquerons les applications dont elle est susceptible dans l'investigation des phénomènes physiologiques. Au reste, elle mériterait encore cette épithète particulière, en raison des développemens que nous nous proposons de donner relativement à l'influence que les agens physiques extérieurs peuvent exercer sur l'économie animale.

DE L'ESPACE EN GÉNÉRAL.

2. L'espace peut être, jusqu'à un certain point, considéré indépendamment de la matière ou des corps. En effet, notre système planétaire et les milliers d'étoiles fixes que nous apercevons avec nos télescospes sont placés dans un vide immense qui existerait encore quand tous ces astres seraient anéantis : par-delà ces astres mêmes on peut toujours concevoir un espace ; mais il est impossible de concevoir à l'espace une limite quelconque; c'est pourquoi l'on doit dire qu'il est *indéfini*. L'esprit de l'homme, qui n'a ni mesure ni limites, se complaisant naturellement dans la considération des sujets qui ne lui apportent aucune en-

trave, s'est exercé sur cette idée de l'immensité, qui contient tous les mondes visibles sans en être ni rempli ni terminé; on a dit qu'un plan imaginaire qui terminerait l'espace aurait deux faces, dont l'une appartiendrait à quelque chose au-delà; on a dit qu'un homme supposé placé aux limites de l'espace pourrait encore étendre le bras. Mais ces considérations générales ne sont applicables à aucun de nos besoins réels; il devient donc nécessaire de limiter l'espace en réalité ou du moins par la pensée, et dans chacun de ces deux cas l'*espace* prend le nom d'*étendue*.

On peut donc dire que l'espace est le lieu indéfini où se trouvent les corps, et que l'étendue est l'espace terminé par la matière, ou par des suppositions de limites idéales. C'est ce que nous examinerons après avoir donné une idée de la matière et des corps.

DE LA MATIÈRE ET DES CORPS.

3. Pour peu que nous réfléchissions sur nos sensations, il nous est bientôt démontré que nous existons, et que nous sommes entourés d'autres êtres qui affectent nos sens. On a donné le nom de corps à ces êtres; et comme ils ont tous quelque chose de commun, malgré les variétés qu'ils présentent, on suppose qu'ils ont une base commune, et qu'ils sont formés d'un même être, que l'on nomme *Matière*.

Ainsi l'on entend par matière *ce qui compose les corps*, et par corps *tout ce qui affecte nos sens*; cette dernière définition n'est peut-être pas exacte, car nous ne pouvons pas douter que, dans beaucoup de cas, nos sens sont en rapport avec des corps sans en être affectés; tandis que, d'autre part, nous sommes susceptibles d'éprouver de vives sensations en l'absence du corps qui semble les

produire. Nous trouverons, par la suite, plus exact de dire que l'on doit nommer corps tout ce qui obéit à l'attraction.

La matière en général, et les corps en particulier, produisent des phénomènes; ces phénomènes sont réellement tout ce que nous savons de positif; nous en acquérons la connaissance par la simple *observation*, ou par des *expériences*. L'observation consiste à fixer notre attention sur les phénomènes qui se produisent naturellement; l'expérience a pour objet de produire exprès un phénomène, afin de l'observer.

4. En faisant usage de ces deux moyens, on reconnaît aisément qu'il est un certain nombre de manières d'être qui appartiennent indistinctement à tous les corps, comme l'*étendue*, l'*impénétrabilité*, la *mobilité* et la *divisibilité*; c'est-à-dire que, sous quelques formes corporelles que se présente la matière, elle occupe une place dans l'espace; que cette place occupée par elle ne peut pas l'être en même temps par une autre matière; que cette place peut changer, ou que la matière qui est dans un lieu peut être portée dans un autre; enfin que cette matière, ayant une étendue, peut être partagée par moitié, par quarts, etc.

On nomme ces quatre conditions communes *propriétés générales de la matière*. Ces conditions méritent bien le nom de propriétés, car elles sont inséparables de l'idée de matière et ne dépendent que d'elle; en un mot elles lui sont *propres*.

Il n'en est pas de même de ce qu'on a si mal à propos nommé propriétés particulières des corps; celles-ci dépendent ordinairement de certaines puissances qui existent ou se produisent dans les corps, agissent sur leurs molécules, se combattent, s'équilibrent, etc. Mais le jeu de ces

puissances n'est point une propriété du corps, au sein duquel elles agissent.

Ainsi ce n'est point une propriété de l'acier d'être élastique; cette manière d'être dépend d'un équilibre entre les forces d'attraction et de répulsion, qui sollicite ces molécules, équilibre fixe qui les maintient dans des rapports donnés; en sorte que, si on les déplace de quelque chose, elles tendent à revenir à leur position première: la preuve, c'est qu'il suffit de changer l'arrangement des molécules pour détruire l'élasticité sans changer la nature du corps. La solidité n'est pas davantage une propriété des corps, car le même corps peut être solide, liquide ou gazeux, suivant qu'on augmente la force répulsive du calorique.

L'emploi du mot propriété est un reste de l'ancienne philosophie; on ne doit en faire usage que quand on ne connaît aucune puissance ni aucune loi qui rende compte des phénomènes.

Pour expliquer notre pensée à cet égard, nous dirons qu'en chimie on a dit propriété *acide* et propriété *alcaline*, tant qu'on n'a connu aucune loi qui expliquât ces deux états, tandis qu'aujourd'hui on dit qu'un corps est *électro-négatif* ou *électro-positif*, pour indiquer la cause de la tendance à la combinaison.

S'il venait à se confirmer que les corps eussent généralement un caractère électrique déterminé et indélébile, ce caractère deviendrait à juste titre une *propriété* de chaque corps, car il lui serait propre et en serait inséparable; c'est ainsi que l'on peut dire que l'oxigène est *électro-négatif*, comme on dit que la matière est *impénétrable*.

Nous traiterons par la suite de ces manières d'être variables que présentent les corps solides, liquides ou fluides aériformes, et s'il nous arrive d'employer quelquefois

l'expression de *propriété*, il sera bien entendu que nous ne le ferons que pour abréger le discours ou nous prêter à un langage encore employé par la plupart des savans.

DE L'ÉTENDUE.

5. L'étendue étant l'espace limité par la pensée ou par les corps eux-mêmes, nous devons la considérer sous ces deux points de vue.

Les géomètres supposent qu'une portion quelconque de cette étendue abstraite est enfermée par des lignes ou des surfaces imaginaires; et quand ils parlent d'un cube, par exemple, il n'entre dans leur pensée aucune idée de matière; ce n'est ni un cube de bois, ni un cube de fer, c'est un espace vide, circonscrit par la pensée entre six carrés égaux. Ils vont encore plus loin, ils supposent que l'étendue peut être déterminée en longueur seulement, et c'est ce qu'ils nomment une ligne; en longueur et en largeur, ce qui constitue la surface; enfin, dans les trois sens à la fois, ce qu'ils nomment solidité; il faut même admettre avec eux qu'un point qui termine une ligne existe dans l'espace sans en occuper aucune partie, qu'il n'a par conséquent d'étendue dans aucun sens.

Toutes ces abstractions servent à fonder les règles, très-positives, de la géométrie, qui s'appliquent ensuite heureusement à des corps réellement matériels.

Il ne suffit pas de déterminer l'étendue et de lui donner une configuration; il est encore indispensable de fixer les rapports qu'ont entre elles des étendues diverses, et c'est ce qui constitue la mesure.

La mesure de l'étendue, dans un des sens que nous venons d'indiquer, ne peut être pour nous que le résultat d'une comparaison, car rien n'est petit ou grand par lui-

même : le premier de ces moyens de comparaison est nécessairement le *moi physique*, ou le corps même de l'individu qui cherche à connaître l'étendue. On prend donc une idée de mesure d'une étendue quelconque, en comparant cette étendue avec ce corps ou une partie de ce corps : de là sont venues les mesures qu'on a nommées un *pied*, un *pouce*, une *palme*, une *coudée*, etc. Les dimensions du corps de l'homme n'étant pas constantes, on a formé des *étalons* d'une dimension fixe. Lorsque l'étendue excède de beaucoup la dimension des mesures, on répète la comparaison, et on obtient des nombres de mesures, auxquels, pour la commodité de l'expression, on a donné des noms, comme celui de *toise* pour une étendue de six pieds, et celui de *lieue* pour une étendue de 2,000 toises.

Les étalons successivement établis par les différentes nations n'ayant rien de bien constant en eux-mêmes, et présentant de très-grandes différences d'une nation à une autre, on a imaginé en France de prendre pour objet de comparaison des étendues le cercle même de la terre que nous habitons. La dix-millionième partie du quart de ce cercle, qui équivaut à 36 pouces 11 lignes 296 millièmes de ligne de l'ancien *pied* de France, a reçu le nom de *mètre*, et cette longueur sert d'objet de comparaison pour toutes les mesures possibles. En la divisant de dixième en dixième, on obtient les *décimètres*, *centimètres* et *millimètres*; en la multipliant par dix, cent, mille, etc., on obtient les *décamètres*, *hectomètres*, *kilomètres*, etc. En la comparant à deux dimensions d'une étendue, on obtient les mesures de superficie, dont le mètre carré est l'unité. En l'appliquant aux trois dimensions, on obtient le mètre cube, qui est l'élément des mesures de volume ou de solidité.

Enfin, comme nous le verrons, en parlant du poids, on

a trouvé le moyen d'en tirer un élément de pesanteur, par la quantité d'eau pure qui a pour mesure exacte un décimètre dans ses trois dimensions.

6. L'étendue limitée dans un ou plusieurs sens représente des figures que l'on nomme géométriques. Ainsi la ligne ou l'étendue limitée en longueur peut être droite ou courbe; une seule ligne courbe peut limiter un espace dans deux dimensions et produire une surface finie: tel est le cercle, dont tous les points sont également distans de celui qu'on nomme centre. Une ou deux lignes droites ne peuvent limiter une étendue en surface; mais trois lignes droites peuvent produire tous les genres de triangles; un plus grand nombre de lignes produit les polygones réguliers ou irréguliers.

Des surfaces limitées par des lignes peuvent enfermer un espace dans les trois dimensions; mais il faut au moins quatre triangles, comme dans la pyramide la plus simple; ou cinq surfaces, comme dans le prisme triangulaire. Un plus grand nombre de surfaces donne tous les polyèdres réguliers ou irréguliers.

Enfin il est des solides limités par des surfaces courbes. On nomme *solides* de *révolution* ceux que l'on peut considérer comme engendrés par la rotation d'un plan autour d'une ligne. Ainsi la sphère peut être supposée formée par la rotation d'un cercle autour de l'un de ses diamètres; le cylindre, par la rotation d'un carré autour d'un de ses côtés; et le cône, par la rotation d'un triangle rectangle également autour d'un de ses côtés.

7. L'application de la mesure, ou la comparaison d'une dimension primitive donnée, avec celles que présentent les différens corps, n'est pas toujours aussi simple qu'on l'imaginerait au premier coup d'œil. S'il est question de me-

surer une ligne droite, il suffit de lui appliquer la mesure droite dont on fait usage, pour en déterminerla longueur; mais si la ligne à mesurer est courbe, l'application exacte devient impossible, et le calcul lui-même ne donne que des approximations plus ou moins parfaites. C'est ainsi que la circonférence d'un cercle est à son diamètre comme 3 est à 1, comme 22 est à 7, ou comme 3,1415926 est à 1, par approximation toujours croissante, et qui ne saurait jamais arriver à l'exactitude absolue.

La mesure des surfaces est soumise à des règles un peu plus complexes. S'il est question d'un carré régulier ou de tout autre rectangle, et que chacun de ses côtés représente 100 millimètres, on conçoit que les 100 millimètres de la base, pour 1 millimètre de la hauteur, présenteront 100 petits carrés de 1 millimètre chacun. Si l'on considère 2 millimètres de hauteur, il y aura 200 petits carrés de 1 millimètre; et si l'on continue ainsi pour les 100 millimètres de la hauteur, on aura dans la surface du carré 10,000 millimètres carrés. Il est donc évident qu'on obtient la surface d'un carré en multipliant sa base par sa hauteur. Or on démontre en géométrie que tous les parallélogrammes construits sur la même base et avec la même hauteur sont égaux en surface. On obtient donc la surface de tout parallélogramme en multipliant sa base par sa hauteur. On démontre encore en géométrie que tout triangle est la moitié d'un parallélogramme construit sur sa base et sa hauteur; on obtient donc la surface de tout triangle en multipliant sa base par la moitié de sa hauteur. Quant aux surfaces limitées par des lignes courbes, il est quelquefois très-difficile de les obtenir; et dans tous les cas elles sont approximatives. Pour le cercle, on le suppose formé d'une infinité de triangles, dont les bases sont à la circonférence et les sommets au centre; et l'on obtient

par conséquent sa surface en multipliant la circonférence ou la somme de toutes les bases par la moitié du rayon, hauteur commune de tous les triangles.

Quant aux mesures de solidité, en suivant la même marche de raisonnement, on voit que la base d'un cube ou de tout autre parallélipipède qui présenterait 100 millimètres de côté offrirait 10,000 millimètres carrés; que si l'on suppose un seul millimètre de hauteur, on obtiendra 10,000 millimètres cubes; et ainsi de suite pour chaque millimètre de hauteur qu'on ajoutera; en sorte que si le solide a 100 millimètres de hauteur, il contiendra 100 fois 10,000 millimètres cubes ou 1,000,000 de millimètres cubes. Il est donc évident qu'on aura toujours la solidité d'un semblable corps en multipliant la surface de sa base par sa hauteur. Mais comme on démontre en géométrie qu'une pyramide est toujours le tiers d'un prisme qui a même base et même hauteur, on obtient la solidité de toutes les pyramides en multipliant la surface de leur base par le tiers de leur hauteur. Les mêmes règles s'appliquent au cylindre et au cône, qui sont considérés comme un prisme et une pyramide ayant une multitude de faces. Quant à la sphère, on peut la considérer comme formée d'un très-grand nombre de pyramides dont les bases sont à la surface et les sommets au centre; on obtient donc la solidité de la sphère en multipliant sa surface, somme de toutes les bases, par le tiers de son rayon, hauteur commune de toutes les pyramides.

Ce petit nombre de règles suffit pour toutes les mesures usuelles, attendu que toutes les surfaces se réduisent facilement en triangles, et presque tous les corps solides en parallélipipèdes ou en pyramides. C'est ainsi qu'on obtient très approximativement la surface du corps de l'homme, en y traçant un grand nombre de triangles qui se trouvent

alors sensiblement rectilignes, et multipliant la base de chacun par la moitié de sa hauteur.

L'étendue n'est jamais réellement limitée que par la matière qui a la propriété de l'*occuper*, c'est-à-dire de s'opposer à ce qu'une autre matière vienne s'y placer. C'est pourquoi on a dit que la matière était *ce qui résiste.*

L'étendue qu'occupe la matière se mesure suivant les principes que nous venons d'établir. (7)

8. La manière dont l'étendue d'un corps est limitée produit ce que l'on nomme la *forme* ou *configuration*; mais on conçoit que l'étendue matérielle n'admet aucune des abstractions que les géomètres ont introduites, puisqu'en effet la matière est nécessairement étendue dans tous les sens. On distingue cependant dans un corps sa longueur, sa largeur et son épaisseur; et ces dimensions réunies constituent ce que l'on nomme son *volume.*

L'étendue de la matière, ou la place qu'elle occupe en apparence dans l'espace, n'a aucun rapport avec la quantité absolue de cette matière, parce que les particules qui la composent, tout en formant un corps ou une masse quelconque, ne se touchent pas les unes les autres; qu'il y a au contraire entre elles des intervalles plus ou moins grands, suivant l'espèce de matière et son état particulier; en sorte que nous ne connaissons pas d'espace qui, à la rigueur, puisse être considéré comme absolument rempli de matière proprement dite.

Les intervalles qui existent dans les corps entre les particules de matière portent le nom de *pores*; et cette disposition est si générale qu'on en a fait une propriété de la matière, sous le nom de *porosité.* Nous ne la considérons ici que comme circonstance de la matière étendue.

9. Tous les corps étant formés de particules matérielles qui ne se touchent pas, et aucun moyen n'ayant encore

été découvert d'amener un corps quelconque à un tel état que ses molécules ne puissent plus se rapprocher davantage, on doit considérer la porosité comme inhérente à la matière.

Beaucoup de considérations tendent même à prouver que les intervalles qui existent entre les molécules des corps ont beaucoup plus d'étendue que les molécules matérielles elles-mêmes.

10. On nomme masse d'un corps la somme des particules matérielles dont il est composé. On nomme volume d'un corps la place qu'il occupe dans l'espace sous les trois dimensions. Il est facile de concevoir que, sous le même volume, il peut y avoir un nombre de particules plus ou moins grand, suivant l'étendue des intervalles qui les séparent; et ce nombre plus ou moins considérable de particules, sous un volume donné, constitue la *densité* d'un corps.

Un corps est d'autant plus dense qu'il contient plus de particules matérielles sous un volume donné : par exemple, l'or est plus dense que le bois, le bois plus dense que l'air. On dit, en termes abstraits, que la densité est le rapport de la masse au volume : on l'obtient par conséquent en divisant la masse par le volume.

Le seul moyen que nous ayons d'apprécier le nombre relatif de particules matérielles, ou la masse d'un corps, consiste à déterminer son poids, qui n'est autre chose que la somme des puissances de l'attraction agissant sur toutes les particules du corps.

11. Une foule de circonstances naturelles démontrent la porosité des corps.

1° Si l'on mesure avec exactitude le volume d'un corps à la température ordinaire, et qu'ensuite on refroidisse ce corps, on trouve, en le mesurant de nouveau, que son

volume a sensiblement diminué : cela arrive même aux corps les plus denses. Or, il est clair que les molécules du corps ne se touchaient pas, puisqu'elles ont pu se rapprocher.

2° Il est une foule de corps que l'on nomme *poreux*, et dans lesquels les espaces vides sont si grands que d'autres corps s'y introduisent avec beaucoup de facilité. C'est ainsi que l'eau pénètre l'éponge, les bois tendres, le charbon, etc. Une espèce d'agate que l'on nomme *hydrophane* présente, malgré sa dureté et sa densité, un phénomène du même ordre : lorsqu'elle est sèche, elle n'est pas transparente ; si on la plonge dans l'eau, elle en absorbe un sixième de son poids et devient transparente.

On fait en physique une expérience qui prouve la porosité des corps. On fait le vide, à l'aide de la machine pneumatique, sous un récipient cylindrique et fort élevé, qui n'est fermé supérieurement que par une peau de buffle sur laquelle on a déposé du mercure, substance qui ne la traverse pas naturellement ; mais aussitôt que le vide est fait, la pression de l'air extérieur fait passer le mercure à travers la peau, et on le voit tomber en pluie fine dans le récipient.

12. On a coutume de citer, comme un exemple frappant de la porosité des corps, la grande quantité de sueur ou de transpiration insensible qui s'échappe sans cesse à travers la peau de l'homme : il est impossible de trouver un exemple plus mal choisi. Cette transpiration est évidemment apportée à la surface de la peau par des vaisseaux particuliers, qui doivent être en continuité avec le système circulatoire général. Les ouvertures qui doivent exister dans la peau ne sont donc point des pores, mais bien les extrémités de ces vaisseaux. La transpiration est une *sécrétion* ou une *exhalation*, et non une *transsudation*. Il

est même évident que la vie ne saurait se maintenir si les membranes du corps jouissaient de la même porosité que les autres corps naturels, car tous les fluides se confondraient bientôt les uns avec les autres; tandis que les fonctions de la vie dépendent principalement de leur isolement.

Cette disposition exceptionnelle des membranes vivantes est d'autant plus sensible qu'aussitôt après la mort elles deviennent effectivement poreuses, et laissent transsuder les liquides, qui se mêlent alors les uns aux autres.

On a confondu, dans cette fausse et dangereuse application à l'économie animale, l'état de la peau vivante et adhérente aux autres organes avec celui de la peau morte et séparée du reste du corps, et l'on conçoit que, dans cette dernière, tous les vaisseaux exhalans étant rompus laissent dans son tissu le grand nombre de petites ouvertures qui permettent le passage des liquides. Le défaut de porosité des membranes qui constituent les parois des vaisseaux dans l'économie vivante est essentiellement relatif à la nature des fluides qu'ils contiennent, et nous verrons, à l'article de la porosité des corps solides et de leur imbibition, qu'il existe de véritables raisons physiques de l'impénétrabilité des parois vasculaires pour les liquides qu'elles contiennent, raisons qui sont avouées de la plus saine physiologie.

DE LA MOBILITÉ.

13. La mobilité est cette faculté dont jouissent toutes les particules de la matière de pouvoir être transportées d'un lieu dans un autre. Ce déplacement porte le nom de *Mouvement*. Si la mobilité appartient à la matière, il n'en est pas de même du mouvement : ainsi, la matière est

susceptible d'être mue, sans pourtant se mouvoir par elle-même. Les causes qui déterminent le mouvement portent le nom de *Forces* ou de *Puissances*. Le mouvement n'existe jamais sans force qui le détermine; mais ces forces peuvent exister et agir sans que le mouvement ait lieu; car deux forces opposées peuvent se faire équilibre ou se compenser mutuellement, en sorte que la matière reste en repos, quoique sollicitée par ces deux forces. On distingue un grand nombre d'espèces de mouvemens, dont nous traiterons par la suite. Mais ce qu'il y a de commun à tout déplacement de la matière, c'est ce qu'on nomme *Vitesse* et ce qu'on nomme *Inertie*.

14. On entend par *vitesse* l'espace qu'un corps en mouvement peut parcourir dans un temps donné, et l'on conçoit que pour faire cette évaluation il faut adopter une mesure comparative ou une unité de temps, comme on adopte une mesure comparative ou une unité d'étendue : par exemple, on prend ordinairement pour unité de temps la seconde, et pour unité d'étendue le mètre. Cela posé, une masse de matière qui parcourrait un mètre de longueur dans une seconde de temps aurait une vitesse déterminée ; et une autre masse qui parcourrait deux mètres de longueur en une seconde de temps aurait une vitesse double.

Lorsqu'une masse de matière se meut avec une vitesse donnée, chacune des molécules qui la composent est nécessairement animée de la même vitesse : ainsi, le mouvement réel est égal à la vitesse multipliée par le nombre des molécules ou par la masse du corps, et ce produit se nomme *Quantité de mouvement*.

La nature ou l'essence des forces qui meuvent les corps nous étant absolument inconnues, nous ne pouvons les apprécier ou les comparer que par la quantité de mouvement qu'elles impriment aux corps.

15. On entend par *inertie* cette propriété de la matière qui la fait persévérer dans l'état de repos ou de mouvement où elle se trouve, en sorte que si un corps est en repos il y restera jusqu'à ce qu'une puissance quelconque le mette en mouvement, et que si un corps est actuellement en mouvement il se mouvra uniformément jusqu'à ce qu'une puissance quelconque vienne détruire son mouvement acquis. Cette proposition n'est autre chose qu'une nouvelle expression de l'inaptitude de la matière à se donner par elle-même aucun mouvement; car par la raison que la matière n'a pas en elle de puissance motrice pour lui faire quitter l'état de repos, elle n'a pas non plus en elle de quoi détruire un mouvement acquis; ce qui supposerait une puissance opposée.

Les physiciens ont souvent fait de l'inertie une puissance ou une résistance, parce qu'on croit sentir, en effet, lorsqu'on frappe un corps immobile avec la main, que ce corps résiste au mouvement qu'on cherche à lui imprimer : mais nous verrons, à l'article du choc des corps, que cette prétendue résistance n'est autre chose que le partage du mouvement entre le corps qui en jouit et celui qui en était privé.

DE LA DIVISIBILITÉ.

16. La divisibilité est, en quelque sorte, une conséquence nécessaire de l'étendue, car si une masse de matière occupe une fraction quelconque de l'espace, on peut toujours lui supposer deux moitiés, et chacune de ces moitiés en a deux elle-même, ce qui semble donner une progression décroissante sans limites. On a fondé sur de semblables considérations l'idée de la divisibilité infinie de la matière, qui a donné lieu à tant de vaines disputes.

Il faut d'abord remarquer que la matière est susceptible, par des moyens naturels ou artificiels, d'une division qui passe l'imagination : quelques fleurs suffisent pour répandre un parfum très sensible dans une grande masse d'air qui se renouvelle sans cesse ; si l'on dépose un grain de musc dans une chambre dont la masse d'air se renouvelle plusieurs fois par jour, cet air sera, pendant plusieurs années, imprégné de l'odeur du musc, qui, cependant, au bout de ce temps, n'aura pas perdu sensiblement de son poids.

Les opérations de nos arts mécaniques, si grossières en comparaison de celles de la nature, offrent cependant des exemples remarquables de division. Un grain d'or, ou 53 milligrammes, réduit en feuilles par le marteau, peut couvrir une surface de 50 pouces carrés, chaque pouce carré a 27 millimètres de côté, et chaque millimètre peut être aisément divisé en huit parties visibles, ce qui donne plus de deux millions de parties visibles à l'œil nu, dans un grain d'or.

Un cylindre d'argent doré au moyen d'une once d'or ou 30 grammes peut être réduit en un fil de 444 mille mètres de longueur, ou plus de 100 lieues ; ce fil peut être aplati par un laminoir ; il présente alors deux surfaces couvertes d'or dans tous les points ; cette lame, ayant un quart de ligne de largeur, peut être coupée en deux, ce qui produit quatre longueurs de 444 mille mètres chacune ; et chaque millimètre de cette étendue peut être divisé en huit parties visibles, ce qui donne plus de 14 billions de parties visibles dans une once d'or qui présente en masse un petit cube qui n'a pas plus de 12 millimètres ou 5 lignes 1/3 de côté.

Haüy a divisé mécaniquement le mica en lames qui réfléchissaient un beau bleu ; ce qui, d'après la règle de Newton, indique une épaisseur tellement petite qu'il pourrait y avoir 23,255 de ces lames dans une épaisseur d'un millimètre.

Les exemples les plus frappans de la division de la ma-

tière se trouvent certainement dans la nature vivante, car, sans parler de l'extrême ténuité des petits canaux par lesquels sortent les fils nombreux qui, par leur réunion, forment un seul fil de l'araignée, canaux qui sont pourtant organisés et composés d'un grand nombre de parties différentes, les animaux microscopiques qui peuvent exister par milliers dans une goutte de liquide sont souvent d'une organisation très complexe; ils exécutent des mouvemens rapides, poursuivent et dévorent leur proie : leurs vaisseaux doivent être très petits; et si les globules du sang de l'homme n'ont qu'un trois centième de millimètre de diamètre, quel peut être celui des globules du sang d'un animal microscopique?

17. Une observation remarquable que le génie de Newton avait saisie et que la chimie moderne a mise dans tout son jour, c'est que ces particules de matière dont la petitesse est presque infinie, et qui semblent encore susceptibles de division, sont cependant, par leur nature, inaltérables et indestructibles. Nous ne connaissons aucun moyen qui puisse anéantir la moindre parcelle de la matière, ou qui puisse même en altérer la moindre propriété. Les dernières particules de carbone qui entrent dans la composition d'un globule des fluides circulans d'un animal microscopique jouissent de toutes les propriétés d'un morceau de charbon qui alimente nos foyers; on peut faire entrer un atome de charbon dans une multitude successive de combinaisons, et le retrouver ensuite avec toutes les propriétés qu'il avait avant ces combinaisons : en sorte que, suivant l'expression du célèbre philosophe anglais, il semble que l'auteur de toutes choses ait voulu composer l'univers matériel de molécules indestructibles et douées de propriétés immuables.

18. Le système atomistique de Dalton, résultat si fécond

et si brillant des succès de la chimie moderne, semble indiquer que les atomes ou les dernières particules de la matière ont pour chaque corps différent un poids relatif qui fait partie de leurs propriétés immuables; ce qui supposerait ou que la pesanteur agit diversement sur les différentes molécules, ou que la division de la matière s'arrête pour chaque corps à un terme particulier qui produit des atomes plus ou moins gros, et par conséquent plus ou moins pesans.

On observe, en effet, que si l'on fond ensemble du soufre et du fer, on obtient une masse qui jouit de propriétés nouvelles; que si l'on divise autant qu'on voudra cette masse, chacune de ses parties les plus petites contiendra un peu de fer et un peu de soufre; ce qui prouve invinciblement que dans la masse il y a au moins autant d'atomes de soufre que d'atomes de fer; mais si l'on vient à rechercher quels sont les poids de fer et de soufre qui peuvent ainsi se combiner intimement, on trouve qu'il faut exactement 20 parties de soufre et 35 parties de fer en poids : or, comme il doit y avoir dans les 20 parties de soufre autant d'atomes que dans les 35 parties de fer, il faut absolument que les poids des atomes isolés de soufre et de fer soient entre eux comme 20 est à 35, c'est-à-dire que l'atome de soufre soit beaucoup moins pesant que celui de fer. Ce résultat est d'autant plus incontestable que si l'on examine des combinaisons du soufre et du fer avec d'autres corps, on trouvera que les nombres 20 et 35 conviendront toujours pour représenter le rapport des poids de leurs atomes.

On peut conclure de ce qui précède que tous les corps simples sont formés d'atomes de poids fixes et différens; que nous ne connaissons pas le poids absolu de chaque atome, mais bien le rapport qu'il y a entre ces différens poids.

Les corps composés de deux, de trois, de quatre corps simples, sont indécomposables par des moyens mécaniques; quoiqu'on les divise autant que possible, ils conservent toujours les mêmes propriétés : il doit donc exister des atomes *binaires*, *ternaires*, *quaternaires*, etc., et ces atomes doivent avoir un poids égal à la somme des poids des atomes simples qui entrent dans leur composition; c'est ce que l'expérience confirme en effet. Voyez notre *Dictionnaire de Chimie*, au mot *Système atomistique*.

DE L'IMPÉNÉTRABILITÉ.

19. On nomme *impénétrabilité* cette propriété de la matière, en vertu de laquelle sa présence, dans un espace donné, en exclut nécessairement toute autre quantité de matière; on la dépeint encore plus exactement, en disant que deux particules de matière ne peuvent pas occuper la même place dans l'espace. On peut même ajouter que ce caractère constitue essentiellement la *matérialité*; il en résulte que, lorsque l'on mêle ensemble deux volumes de deux corps, le volume du mélange doit être égal à la somme des volumes des corps mêlés ou combinés : cela arrive en effet le plus souvent. Ainsi, lorsque l'on mêle un décimètre cube d'eau avec un décimètre cube de vin, on obtient deux décimètres cubes de mélange; lorsque l'on vient à lancer une bille d'ivoire contre une pareille bille en repos, la première prend la place de la seconde, mais après l'avoir chassée dans un autre lieu. L'impénétrabilité est même une condition indispensable à la communication du mouvement, car sans elle le corps en mouvement traverserait l'espace occupé par le corps en repos, sans agiter celui-ci.

On rend l'impénétrabilité sensible, même pour l'air,

en renversant une cloche vide dans un vase plein d'eau : on voit alors que l'eau n'entre pas dans le vase, parce que l'air conserve la place qu'il occupait. On démontre la même chose en scellant la queue déliée d'un entonnoir dans le goulot d'un vase plein d'air, et en versant de l'eau dans l'entonnoir : on voit que l'eau ne peut pas descendre dans le flacon, à cause de la résistance que lui fait éprouver l'air.

Il est une foule de circonstances dans lesquelles cette loi paraît, au premier aspect, contredite par les faits : ainsi un morceau de sucre se laisse pénétrer par l'eau sans augmenter de volume; l'eau et l'alcool, l'eau et l'acide sulfurique, diminuent de volume dans leurs mélanges; mais toutes ces anomalies tiennent à la porosité : ainsi les molécules de l'eau n'occupent pas la même place que celles du sucre, elles pénètrent seulement les pores du sucre qu'elle remplit, en en chassant souvent l'air qui les occupait ; l'affinité de l'eau et de l'acide sulfurique est cause que les particules d'eau se placent très près des molécules d'acide sulfurique, ce qui les oblige à se rapprocher entre elles, etc. L'impénétrabilité appartient à la matière considérée molécule à molécule, mais elle n'est jamais absolue pour les corps; ces corps peuvent être impénétrables pour certaines substances et pénétrables pour d'autres. Ainsi l'huile pénètre le marbre qui ne se laisse pas pénétrer par l'eau. Nous exposerons ces notions qui importent à la physiologie, en traitant de l'imbibition.

L'impénétrabilité présentant de grandes variétés, suivant les différens états des corps, nous y reviendrons en appliquant les lois générales aux corps solides, liquides et gazeux.

DES CORPS.

20. On donne le nom de Corps à tout ce qui compose matériellement la nature, et ce mot désigne plus particulièrement certaines masses ou réunions de particules de matière qui, par leur nombre, leur nature et leur arrangement, contractent certaines dispositions spéciales que l'on ne regarde pas comme appartenant généralement à la matière. Ainsi, des particules de soufre régulièrement arrangées forment un *solide* cristallisé qui est jaune, cassant, transparent. Ces mêmes particules, à un certain degré de chaleur, se meuvent librement les unes sur les autres, et présentent un *liquide* qui n'a pas de forme par lui-même, qui est brun, etc. Enfin, à une température plus élevée, les particules de soufre, écartées les unes des autres, forment une vapeur dont les apparences physiques ne ressemblent en rien à celles du solide et du liquide. On voit donc que les mêmes particules de matière, tout en conservant les quatre propriétés générales qui la caractérisent partout, peuvent, en vertu de certaines causes ou circonstances que nous apprécierons plus tard, former des corps différens qui présentent des manières d'être spéciales.

On voit encore que la matière, lorsqu'elle entre dans la composition des êtres organisés, végétaux ou animaux, contracte et présente des propriétés absolument différentes de toutes celles qu'on peut remarquer dans les corps qui sont bruts ou inorganiques : par exemple, dans tous les corps bruts, et c'est un principe que nous avons établi d'une manière absolue, la matière est incapable d'aucun mouvement propre ; dans les êtres organisés, au contraire, elle est dans un état de mouvement et de déplacement

continuels, et ces mouvemens ne sauraient même s'expliquer par l'influence des forces ou puissances qui peuvent en produire dans la nature morte.

Ces considérations ont amené des divisions et subdivisions des différens corps naturels : on les distingue en corps *bruts* et corps *organisés*. On divise les corps bruts, qui font ici l'objet spécial de notre étude, en corps *solides*, corps *liquides*, et corps *gazeux* ou *fluides aériformes*. Enfin, la nature, nous offrant des phénomènes de dilatation, de production de chaleur, etc., qui s'expliquent assez bien par la supposition de l'existence d'un corps que l'on a nommé *calorique*; des répulsions et des attractions se produisant entre les corps, dans certaines circonstances, sans qu'on puisse les expliquer par les lois générales, tandis qu'on s'en rend compte en admettant l'existence d'un corps que l'on nomme *Électricité*; et tous les phénomènes de la vision se concevant avec facilité, quand on suppose l'existence d'un fluide nommé *Lumière*, on est convenu d'admettre, dans la nature, le calorique, l'électricité et la lumière, comme causes de ces divers phénomènes; et comme ces corps doivent être très rares et très élastiques, on les a comparés, par analogie, aux fluides élastiques; mais comme aussi on n'a jamais pu réussir à les peser, ni à les enfermer dans des vases, on les a nommés fluides *incoërcibles*, ou fluides *impondérables*.

Nous devons donner ici les caractères qui fondent ces divisions et qui distinguent ces différens genres de corps.

21. *Corps bruts* — Les corps bruts sont incapables d'action par eux-mêmes; en conséquence, ils persistent dans leur état tant qu'une cause extérieure n'agit pas sur eux. Lorsqu'ils s'accroissent, c'est toujours par superposition, ou par de nouvelles molécules qui s'appliquent à leur surface extérieure. Les formes qu'ils affectent quand

leurs molécules sont parfaitement libres de toute influence étrangère, sont toujours rectilignes et planes pour les solides, et sphériques pour les fluides.

22. *Corps organisés.* — Les corps organisés éprouvent une série non interrompue de changemens ou de modifications dans leur nature, même sans le concours d'influences étrangères. Loin de persister dans un état constant, ils naissent, vivent et meurent. Aussi peut-on distinguer en deux mots les corps bruts des corps organisés, en disant que les premiers *existent*, et que les seconds *vivent*. Une partie de la durée de leur vie est employée à l'accroissement; mais il a lieu par intus-susception, c'est-à-dire que les molécules nouvelles s'introduisent et se placent dans l'intérieur de la masse primitive. Enfin les corps organisés, étant constamment formés à la fois de solides et de liquides, affectent des formes plus ou moins curvilignes, suivant les proportions de ces deux élémens, depuis le tronc d'un grand arbre, qui est rectiligne dans un sens, jusqu'à l'hydatide, qui est complètement sphérique.

23. Si l'on veut établir une comparaison plus précise encore entre les corps bruts et les corps organisés, on doit dire que les corps bruts sont dans un état statique, et les êtres vivans dans un état dynamique. En effet, dans tout corps brut, les forces qui sollicitent ses molécules sont ou arriveront instantanément à l'équilibre : c'est ainsi qu'un corps solide conserve son volume, qui est le résultat d'un équilibre entre l'attraction des particules et la répulsion attribuée au calorique; c'est ainsi qu'un corps pesant repose sur une table en vertu du même principe. Il est remarquable que si un corps brut est mis en mouvement, il ne tarde pas à s'arrêter, et qu'ainsi son mouvement accidentel le conduit toujours au repos ou à l'équilibre, enfin à un état statique.

Dans les corps organisés, au contraire, le mouvement ne conduit pas à l'équilibre : le sang, poussé par le ventricule gauche, ne trouve pas de résistance qui fasse équilibre à son impulsion et qui l'arrête : il se meut donc incessamment.

Il est fort important de déterminer la cause de cette grande différence entre les corps bruts et les corps organisés, et cela est d'autant plus intéressant pour nous que cette cause est toute mécanique.

La condition essentielle qui permet l'état statique des corps bruts, c'est que les forces qui agissent en eux sont constantes en elles-mêmes : ainsi la pesanteur étant la même pour tous les corps et constante dans son action, deux poids suspendus à une balance en équilibre resteront immobiles pendant une éternité; mais on conçoit que si la pesanteur était variable dans l'un d'eux, la balance présenterait des mouvemens d'oscillation; il en serait de même, et à plus forte raison, si la pesanteur était intermittente; si, par exemple, à chaque seconde, elle cessait d'agir sur un des corps pour agir sur l'autre, chaque seconde verrait un poids descendre et l'autre monter.

C'est précisément cette intermittence qui fait le caractère essentiel des forces particulières qui se produisent dans les êtres organisés : aucune action de la vie ne saurait être continue, la contraction musculaire en particulier ne peut durer qu'un instant, et ce caractère est si intimement lié à l'essence de la vie que toute continuité d'action tue ou la fonction ou l'être organisé tout entier.

Le mouvement continuel du sang dans les animaux parfaits dépend des alternatives de contraction et de relâchement des cavités du cœur; qu'une seule de ces cavités persiste dans son état de contraction, et toute la circulation est arrêtée.

On peut en dire autant de toute circulation dans un être organisé quelconque, car le mouvement indispensable des liquides ne peut s'expliquer que par la contraction et la dilatation alternatives des cavités quelconques qui contiennent les fluides.

Les phénomènes qui sont sous l'influence du système nerveux, quoique difficiles à rattacher à des forces déterminées, n'en offrent pas moins ce grand caractère d'intermittence que nous signalons.

Un autre point de contraste entre les corps bruts et les corps organisés, c'est la prompte saturation des affinités dans les premiers, et au contraire la disposition constante aux mêmes réactions que présentent les matières qui entrent dans la composition des corps organisés; ce caractere, qui semble plus chimique que physique, est le résultat du même principe : la *saturation* est un état statique, et l'aptitude à la combinaison est un état dynamique.

Le déplacement continu des liquides est la cause immédiate du défaut de saturation et de l'aptitude continuelle aux mêmes combinaisons; ainsi le sang qui arrive au foie contient des élémens qui tendent à s'unir pour former de la bile : il en produit en effet; s'il restait dans le foie, il cesserait bientôt de fournir à cette sécrétion; mais il en est enlevé, et va dans d'autres organes abandonner d'autres élémens et recevoir de nouveaux principes, en sorte qu'en revenant au foie il présente la même tendance aux mêmes réactions.

Ainsi l'état dynamique des êtres vivans est dû à l'intermittence des puissances organiques, et le mouvement produit maintient les affinités.

Nous ajouterons que les puissances toutes physiques qui agissent dans les êtres organisés y conservent leur caractère de constance et servent ainsi de régulateur aux actions va-

riables et intermittentes qui tiennent à la vie. C'est ainsi que l'élasticité des artères modifie et régularise le cours du sang qui est déterminé par les contractions intermittentes et variables du cœur.

24. *Corps solides.* — Les corps solides sont principalement caractérisés par cette circonstance, que les molécules de matière qui les composent sont fixées les unes aux autres et dans la place qu'elles occupent de manière qu'il faut une force appréciable et ordinairement assez considérable pour les déranger de cette situation relative. C'est ainsi que les molécules d'un cube d'or ne peuvent être déplacées de manière à former des feuilles minces de ce métal qu'en employant les percussions répétées du marteau. C'est précisément cette disposition qui donne aux corps solides des formes propres. Il est très difficile de se rendre compte, dans l'état actuel de nos connaissances, des causes de la solidité. On attribue, il est vrai, la fixité des molécules à une sorte d'équilibre qui s'établit entre une puissance que nous étudierons sous le nom d'*Attraction*, et qui tend à rapprocher les molécules; et une autre puissance opposée, qui tend à les écarter, et qu'on attribue au *calorique*. Mais comme nous sommes forcés d'admettre que les particules de la matière ne se touchent pas, même dans les corps solides, il est difficile d'imaginer ce qui peut les empêcher de rouler les unes sur les autres, sans que leurs distances réciproques augmentent ni diminuent, ou de prendre spontanément la forme sphérique.

Quoi qu'il en soit, la solidité a des degrés et présente des modifications qui constituent les propriétés spéciales des corps solides, et que nous étudierons en appliquant les lois générales de la physique aux corps solides en particulier.

Les corps solides peuvent être cristallisés ou amorphes :

mais il paraît constant que, dans tous les cas où ces corps ne présentent point des polyèdres terminés par des arêtes droites et des faces planes, on doit l'attribuer à quelque cause perturbatrice qui s'est opposée à un certain arrangement symétrique et régulier que toutes les molécules de la matière tendent à prendre, lorsqu'elles se réunissent pour former un corps solide. Les lois qui président à cet arrangement symétrique, et qui dépendent en partie de la forme primitive régulière des particules matérielles, font l'objet d'une belle science nommée *Cristallographie*, et dont nous donnerons une idée en traitant de la physique des corps solides. *V.* aussi *Cohésion.*

25. *Corps liquides.* — Les corps liquides se nomment quelquefois aussi fluides; mais cette dernière expression est plus générale, et comprend à la fois les liquides et les gaz.

Les liquides proprement dits sont caractérisés par la facilité avec laquelle leurs molécules glissent et roulent les unes sur les autres au moindre effort; ce qui leur permet de *couler*, de s'échapper en filets par de petites ouvertures, de pénétrer dans des porosités, etc. Malgré cette mobilité, les particules des liquides sont cependant retenues à une certaine distance les unes des autres par une attraction, différente en intensité pour chacun d'eux, mais toujours très sensible.

L'adhérence réciproque des particules des liquides est apparente dans une goutte de mercure que l'on essaie de partager en deux par une pression à la partie moyenne, elle le devient encore davantage lorsqu'on approche deux gouttes du même métal, car, aussitôt qu'elles se touchent par un point, elles se pénètrent rapidement et se confondent pour n'en former qu'une seule.

On démontre et on mesure, en quelque sorte, cette

adhérence par une expérience directe. Si l'on suspend horizontalement un plan de glace à l'un des bras d'une balance, et qu'on le mette en équilibre avec des poids placés dans le plateau de l'autre bras; si l'on fait ensuite poser ce plan à la surface de l'eau, on trouve que, pour le soulever, il faut ajouter un poids considérable dans le plateau; mais quand il est enlevé, on voit qu'une couche d'eau est restée adhérente au plan de glace: le poids employé a donc eu pour effet de détacher la couche liquide superficielle du reste de la masse d'eau. Ainsi le poids est l'expression de la force avec laquelle cette couche superficielle adhérait aux autres particules de la masse liquide.

Les liquides affectent dans l'état ordinaire une foule de formes très variées, qui dépendent des influences extérieures, et que nous expliquerons en appliquant les lois générales aux liquides en particulier. Mais lorsqu'une masse liquide quelconque est abandonnée à elle-même, et parfaitement libre d'influences étrangères, elle prend constamment la forme sphérique.

On peut conclure ce fait *à priori* des considérations mathématiques, car on démontre que toutes les molécules jouissant d'une égale puissance d'attraction, et ayant la même masse, la sphère est la seule forme sous laquelle toutes les forces soient en équilibre; et que les choses se passent exactement de la même manière que si les attractions s'exerçaient toutes au centre de la sphère; auquel cas, pour satisfaire à des puissances égales, les molécules de chaque couche concentrique doivent se trouver à une égale distance du centre, ce qui n'arrive que dans la forme sphérique.

La même proposition devient sensible par une foule de circonstances vulgaires. Si on observe de très petites gouttes de mercure placées sur un corps humide qui exerce peu

d'attraction sur ce métal, ces gouttes paraîtront sphériques; et si on en réunit deux, elles ne formeront plus qu'une seule sphère; si on laisse tomber doucement une goutte d'eau dans l'air, on la verra former une sphère presque parfaite; enfin, pour obtenir du plomb de chasse on fond le métal et on le laisse tomber en pluie d'une assez grande hauteur, pour qu'il ait le temps de se figer en route, et l'on reçoit au bas des sphères solides, très-régulières. Nous ne citons point ici l'exemple de notre globe lui-même, et surtout de sa partie liquide, parce qu'il ne peut être bien compris qu'en traitant de l'attraction.

Les particules de la matière qui composent les corps liquides semblent devoir être sphériques, à cause de leur mobilité; cependant il est constant que la plupart des corps liquides peuvent devenir solides en tout ou en partie, et qu'alors leurs molécules se montrent polyèdriques : on suppose que dans les liquides ces petits corps anguleux sont environnés d'une sorte d'enveloppe de calorique qui prend la forme de sphère. La liquidité a des degrés qui donnent lieu aux diverses consistances que l'on nomme *oléagineuse*, *sirupeuse*, etc., et même on reconnaît un état moyen entre la solidité et la liquidité, que l'on nomme *mollesse;* tel est celui de la cire ou du suif.

26. *Fluides élastiques.* — Les fluides élastiques sont caractérisés par une répulsion constante de leurs molécules, qui produit en eux ce que l'on nomme leur *tension*, ou leur élasticité : loin qu'il soit nécessaire d'employer une force quelconque pour séparer leurs molécules, il faut au contraire en employer une pour les empêcher de s'écarter. Si un gaz était abandonné à lui-même dans l'espace, il en occuperait bientôt toute l'étendue; et quand ce gaz est contenu dans une capacité, il en presse les parois de dedans en dehors avec toute l'énergie de cette puissance répulsive. On

attribue la force de répulsion des gaz à la présence du calorique. Il résulte de cette propriété distinctive que les gaz n'ont pas de formes propres, et qu'ils prennent toujours celles des capacités qui les contiennent; il en résulte aussi qu'ils n'ont point de densité fixe, puisqu'elle dépend de l'énergie avec laquelle on combat leur expansion, ou de la pression qu'ils supportent.

On voit que, dans les gaz, la puissance que nous avons nommée attraction est devenue tout à fait nulle, sans doute à cause du grand écartement des molécules; la forme de ces molécules doit, par la même raison, cesser de modifier les propriétés physiques : aussi les gaz se ressemblent-ils tous, excepté sous le rapport de la pesanteur, qui, comme nous l'avons vu, paraît une propriété des atomes.

L'état gazeux présente deux modifications importantes : tantôt cet état semble inhérent au corps qui ne peut jamais devenir liquide ou solide, comme on le voit pour l'oxigène ou l'hydrogène; c'est ce que l'on nomme fluide élastique *permanent* ou *gaz* proprement dit; tantôt cet état ne persiste que dans certaines circonstances favorables, comme le degré de chaleur par exemple, et le corps revient aisément à l'état liquide , comme il arrive pour l'eau et l'alcool; et c'est ce qu'on nomme *Vapeurs*.

Enfin il y a des gaz intermédiaires qui conservent habituellement leur état, mais qui peuvent devenir liquides sous de très-hautes pressions.

27. *Fluides impondérables.* — Si nous mettons ici au nombre des corps qui composent la nature matérielle ce que l'on a nommé *fluides impondérables*, c'est-à-dire le calorique, la lumière et l'électricité, nous ne le faisons que pour indiquer l'ordre que nous nous proposons de suivre, attendu qu'il reste bien constant que ces prétendus

corps ne sont autre chose que des suppositions qui représentent la cause, inconnue dans sa nature, de certains phénomènes. Et par exemple, si nous admettons l'existence d'un corps nommé calorique, c'est parce qu'en supposant l'existence de ce corps, en admettant que ses particules sont infiniment petites; que, réunies en nombre infini, elles n'ont aucun poids sensible ; qu'elles peuvent librement pénétrer tous les corps de la nature ; qu'elles ont pour ces différens corps des affinités diverses ; enfin qu'elles se repoussent les unes les autres avec une force qui croît comme le carré de leur rapprochement, on explique et l'on peut soumettre au calcul un certain ordre de phénomènes qui ne se concevraient pas autrement.

CHAPITRE II.

NOTIONS GÉNÉRALES DU MOUVEMENT, DE L'ÉQUILIBRE, ET DE LEURS LOIS.

28. La nature ne se compose pas seulement autour de nous de masses matérielles en repos; il se produit sans cesse sous nos yeux des changemens dans leur état et dans leurs rapports; ces changemens portent le nom de *Phénomènes* (1), ils se produisent naturellement ou par des expériences : ils sont faciles à apercevoir ou inaccessibles aux sens; mais, dans tous les cas, en observant attentivement ces phénomènes, il est facile de remarquer que tous consistent essentiellement en un déplacement des particules

(1) L'usage a fait recevoir ce mot dans un sens différent de la valeur étymologique.

matérielles ou en un *mouvement*; quelquefois cependant ce mouvement n'a pas lieu réellement, et le physicien doit tenir compte de la tendance au mouvement.

Les particules de la matière étant par elles-mêmes incapables de se mouvoir, il faut qu'une cause quelconque vienne agir sur cette matière, et c'est à cette cause de mouvement que l'on a donné le nom de *Force* ou de *Puissance*.

Enfin l'exercice même de ces forces, quelles qu'elles soient, est soumis à des lois qu'il est indispensable de connaître pour concevoir le moindre phénomène naturel.

Nous devons donc étudier d'abord le mouvement en lui-même et ses différentes espèces; traiter ensuite des forces en général, et enfin donner les lois qui président à l'exercice de ces forces. Ces notions seront encore abstraites et indépendantes de leur application à telle ou telle espèce de corps; elles seront fort abrégées, car elles constituent une science que l'on a coutume de distinguer de la physique sous le nom de *Mécanique*.

DU MOUVEMENT.

29. On conçoit l'idée la plus simple et la plus générale à la fois du mouvement, en se représentant une particule matérielle qui change de place dans un espace sans limite, et pénétrable en tous sens pour la matière. Il est pourtant vrai de dire que dans la supposition abstraite que nous venons de faire il serait absolument impossible de juger de la réalité du mouvement; la conviction de son existence résulte pour nous de la comparaison que nous faisons entre un corps qui se meut et d'autres corps qui sont immobiles, ou qui se meuvent d'une autre manière. Ainsi le mouvement d'une voiture sur une route, d'un bateau sur une rivière, devient évident par les changemens de relation qui survien-

nent entre ces deux corps et les objets fixes près desquels ils passent. Le mouvement de rotation de la terre sur son axe peut être apprécié en observant les rapports variés qui s'établissent entre les différens points de la circonférence de la terre et les astres que nous nommons *étoiles fixes*. Cette notion pourrait même résulter des relations de la terre avec les autres planètes, qui sont mues elles-mêmes d'un mouvement particulier.

Les comparaisons dont nous venons de parler ont donné lieu à l'expression de *mouvement relatif*, c'est-à-dire dans lequel on voit changer les relations du corps en mouvement avec ceux qui l'environnent. On voit qu'il n'existe pas dans l'univers de mouvement qu'on puisse qualifier d'absolu, puisque nous n'en jugeons que par comparaison.

Cette comparaison donne encore lieu à la distinction de mouvement *commun* et de mouvement *propre*. En effet, deux corps peuvent se mouvoir simultanément dans la même direction et avec la même vitesse de manière à ce qu'ils ne changent point de rapports entre eux, pendant qu'ils en changent continuellement avec tous les corps en repos qui les environnent. On dit que ces deux corps ont un mouvement *commun*.

Il peut arriver qu'un grand nombre de corps se meuvent ainsi simultanément pendant que l'un d'eux se déplace lui-même par rapport aux autres, et l'on dit que ce corps est animé d'un mouvement *propre*. Ainsi, qu'un grand bateau suive le fil d'une rivière; qu'une boule soit lancée par un homme d'un bout de ce bateau à l'autre, il y aura *mouvement commun* pour le bateau, l'homme et la boule: il y aura *mouvement propre* pour la boule dans le bateau; il y aura *mouvement relatif* du bateau par rapport au rivage; il y aura *mouvement relatif* de la boule par rapport aux différentes parties du bateau.

Une circonstance bien importante à remarquer, c'est que les lois qui régissent le mouvement propre d'un corps sont absolument les mêmes, quel que soit le mouvement commun dans lequel ce corps pourra d'ailleurs se trouver entraîné avec les autres corps qui l'entourent. Ainsi, qu'une boule soit jetée par un homme placé sur la terre contre un obstacle ou contre un but, ou que cette action ait lieu dans le bateau en mouvement, la boule lancée avec la même puissance parcourra le même espace, frappera l'obstacle avec la même force, atteindra le but avec la même précision : cette circonstance est d'autant plus heureuse qu'elle nous dispense, dans l'étude des mouvemens propres que nous examinons, de tenir compte des mouvemens communs qui entraînent la terre autour de son axe et dans son orbite. Comme une proposition aussi importante exige une preuve absolue, nous ferons remarquer que le mouvement commun de rotation autour de l'axe de la terre qui appartient aux objets situés sous l'équateur est d'environ 9000 lieues par 24 heures; que le mouvement commun des corps situés plus près des pôles va toujours en diminuant, en telle sorte qu'il est un point, par exemple, où ce mouvement n'est plus que de 4500 lieues en 24 heures. Cependant dans quelque point de la surface de la terre que l'on répète des expériences avec la même machine destinée à produire des mouvemens propres, les résultats seront exactement les mêmes; ce qui démontre que le mouvement commun n'exerce sur eux aucune influence. On prouve encore ce fait en physique par une expérience ingénieuse : un petit chariot très mobile sur quatre roues se meut uniformément sur un plan horizontal; ce chariot porte une potence de six à sept décimètres de hauteur; une bille d'ivoire est reçue dans un godet soutenu par cette potence, et dont le fond s'ouvre à volonté pour laisser tom-

ber la bille; un autre godet est placé sur le chariot verticalement au dessous du premier; dans cet état, si on laisse échapper la bille pendant que le chariot est en repos, elle tombe précisément dans le godet inférieur, et si la bille échappe au moment où tout l'appareil est déjà en mouvement, elle tombe précisément encore dans le godet inférieur. Il est nécessaire pour le succès de cette expérience que le mouvement de l'appareil soit parfaitement uniforme car au moment où la bille s'échappe du godet supérieur elle n'appartient plus au système commun, et si le mouvement du chariot était accéléré ou retardé pendant la chute de la bille, elle tomberait en arrière ou en avant du godet inférieur.

Dans cette ingénieuse expérience, qui a été imaginée par le célèbre Charles, la bille et les deux godets sont animés d'un mouvement commun qui ne change rien au mouvement propre par lequel la bille tombe de l'un dans l'autre, quoique dans l'état de repos elle suive une ligne droite, tandis que dans l'état du mouvement commun du système elle décrit une parabole.

On conçoit que tout ce que nous venons de dire du mouvement est exactement applicable au repos : que le *repos absolu* n'existe probablement pas dans la nature, puisque ses plus grandes masses paraissent agitées de mouvemens communs, et que nous supposons en repos les corps qui ne changent point de relation avec ceux qui les entourent, et auxquels nous les comparons; mais on conçoit aussi que cette comparaison pouvant être faite par rapport à une étendue occupée par un très grand nombre de corps, ou par rapport à une étendue ou à un système de corps très limité, il existe pour nous un grand nombre de repos relatifs pour des corps que nous savons fort bien du reste être en mouvement. Ainsi un arbre, qui ne change

pas de position par rapport à la masse du globe terrestre, est dans un repos relatif par rapport à la terre; nous savons cependant qu'il est en mouvement par rapport au soleil. Le mât d'un vaisseau est en repos par rapport au vaisseau, et en mouvement par rapport à la surface de la mer.

Les différentes sortes de mouvemens et de repos, et la manière de les apprécier, donnent lieu fréquemment à porter de faux jugemens sur la nature ou même l'existence de ces mouvemens. Un homme enfermé dans un bateau couvert est dans un repos relatif aux différentes parties de ce bateau; il acquiert l'idée de ce repos personnel en comparant sa situation avec celle des objets qui l'entourent. Si, dans cet état, il regarde le rivage par une petite ouverture, il supposera ce rivage en mouvement; car les changemens de relation sont évidens, et il est pénétré de l'idée de son repos individuel. Si, au contraire, il est placé sur le pont de ce bateau, et qu'il puisse découvrir à la fois le bateau, la rivière et les champs environnans, l'illusion cessera; il aura la conscience du mouvement qui l'entraîne avec le bateau qui le porte.

Par une erreur opposée, si un homme est placé sur un quai dont la base est baignée par une rivière dont le cours soit paisible, et si cet homme fixe particulièrement ses regards à la surface de l'eau, il jugera cette masse d'eau en repos, à cause de sa surface unie et qui ne change pas d'apparence; mais les petits corps qui flottent à sa surface se déplaçant continuellement par rapport à lui, il supposera bientôt que ce mouvement lui est propre, et croira se sentir transporté dans le sens opposé au courant de la rivière. L'erreur cessera tout à coup, s'il jette à la fois les yeux sur la rivière et sur son rivage.

30. Jusqu'ici nous n'avons considéré le mouvement que d'une manière comparative; en l'examinant en lui-même, on

trouve qu'il présente un certain nombre de modifications qui lui ont fait donner des noms et attribuer en quelque sorte des qualités. Et, d'abord, un mouvement peut être tel qu'il fasse parcourir à un corps un grand espace dans un temps très court, ou un petit espace dans un temps très long: c'est ce que l'on nomme communément mouvement *rapide* et mouvement *lent*. Cette circonstance, très variable dans les différens mouvemens, se nomme *vitesse*, et par conséquent la vitesse n'est autre chose que le rapport de l'espace parcouru au temps pendant lequel il l'a été. Si, par exemple, un corps a parcouru un espace d'un mètre en une seconde, et qu'un autre corps ait parcouru deux mètres en une seconde, on dira que le dernier avait une vitesse double de celle du premier.

Le mouvement n'étant autre chose que le déplacement d'un corps dans l'espace, il est évident que ce déplacement peut avoir lieu dans toutes les *directions* et de toutes les manières. S'il se fait en suivant le plus court chemin d'un point à un autre, on dit que le mouvement est *rectiligne;* mais il peut suivre toute sorte de courbes: on le nomme alors *curviligne.* Il peut enchaîner le corps dans un cercle régulier; on nomme alors le mouvement *circulaire.* Le mouvement reçoit, du reste, les noms des différentes lignes géométriques qu'il peut suivre dans différens cas; de là les noms de mouvemens *parabolique*, *tangentiel*, *normal*, etc.

Lorsque le mouvement qui anime un corps est de telle nature que, pendant toute sa durée, des espaces égaux sont parcourus dans des temps égaux, on le nomme mouvement *uniforme.*

Lorsque le mouvement qui anime un corps est de telle nature que, pendant sa durée, les espaces parcourus vont en augmentant ou en diminuant dans des temps égaux, on dit que le mouvement est *accéléré* ou *retardé.*

Enfin, lorsque l'espace parcouru est augmenté ou diminué de quantités qui suivent une loi constante dans des temps égaux et successifs, on dit que le mouvement est *uniformément* accéléré ou retardé.

DES FORCES OU PUISSANCES.

31. La seule idée générale que l'on puisse prendre de ce que l'on entend par *force* ou *puissance* s'exprime en disant que la force est la cause du mouvement. Les premières idées de l'existence de semblables causes nous viennent de nous-mêmes et de l'exercice de nos propres facultés. Ainsi, qu'un homme enlève un poids posé sur la terre, qu'il lance au loin un corps qu'il aura saisi, qu'il brise en la ployant une barre de fer ou de bois, il est évident qu'il aura déployé une faculté qui lui est naturelle et qui est propre à déterminer des mouvemens dans les autres corps. C'est cette faculté qu'on nomme la *force* de l'homme; et nous avons donné, par extension, le même nom à toutes les causes que nous supposons capables de déterminer également des mouvemens dans les corps; ou plutôt, ayant observé et mesuré ces mouvemens, nous avons supposé l'existence de certaines causes capables de les produire, et que nous avons nommées *Forces*. Il suit donc nécessairement de cette définition que nous n'avons d'idées de la force que par les effets que nous supposons produits par elle, c'est-à-dire par le mouvement lui même.

Pour bien concevoir cette idée de la force, on peut prendre pour exemple celle que l'on nomme *Pesanteur*. Si un corps est éloigné de la terre et qu'on l'abandonne à lui-même, il s'en rapproche avec plus ou moins de vitesse et parcourt l'espace qui l'en sépare : or, comme la matière est inerte par elle-même, il faut supposer que ce corps est

sollicité ou entraîné par une force ou puissance. Nous ignorons absolument la nature et l'origine de cette force; nous la nommons *attraction*, parce qu'elle tend à rapprocher les corps.

La force que nous venons de prendre pour exemple paraît solliciter généralement tous les corps de la nature.

Les hommes qui ont voulu se rendre compte des innombrables phénomènes que l'étude des sciences naturelles leur a fait connaître ont été conduits, à l'exemple de Newton, à supposer l'existence d'un certain nombre de forces, dont chacune sert à rendre compte d'un certain ordre de faits : la répulsion entre des fluides électriques de même signe, et l'attraction entre les fluides de nom contraire, sont des suppositions de cet ordre.

Dans l'état actuel des connaissances, un assez grand nombre de suppositions de forces est devenu nécessaire, et il devient essentiel de les classer.

On doit diviser les forces qui nous paraissent nécessaires à l'explication de tous les phénomènes naturels en trois classes.

La première classe renferme des puissances qui agissent incessamment et partout sur la matière, savoir : l'attraction et la répulsion, attribuées au calorique.

Les caractères des puissances de cette première classe sont : 1° d'agir incessamment sur tous les corps; 2° de présenter une intensité constante quand les circonstances ne changent pas; 3° d'agir en raison directe des masses, et inverse du carré des distances.

La seconde classe renferme des puissances que nous nommerions volontiers accidentelles : elles sont en grand nombre et servent à expliquer beaucoup de phénomènes naturels qui ne s'expliqueraient pas à l'aide de l'attraction générale et de la répulsion du calorique; leur nombre

même prouve qu'elles se rapportent à des faits qui ne sont pas encore bien interprétés, car on le voit diminuer à mesure que les sciences se perfectionnent.

On peut ranger dans cette seconde classe les forces d'attraction et de répulsion de l'électricité de tension, la force électromotrice qui sépare les deux fluides électriques au contact de deux corps, les forces d'attraction et de répulsion qu'exercent les courans, la force qui se développe dans un corps lumineux et qui fait vibrer l'éther, etc.

Ces forces de la deuxième classe ont pour caractères : 1° d'être accidentelles ou temporaires, en sorte qu'un système de corps d'abord étranger à ces forces peut tout à coup les développer, puis cesser de les produire; 2° de n'avoir aucun rapport connu avec les masses; 3° de s'exercer en raison inverse du carré de la distance dans tous les cas où on a pu le constater; 4° d'être produites dans des circonstances dont beaucoup nous sont connues, en sorte que nous pouvons à volonté les produire, les modifier et les détruire.

La troisième classe des forces naturelles peut prendre le nom de *vitales* ou *organiques :* on doit les supposer dans les êtres vivans pour concevoir les phénomènes qu'ils présentent.

Dans l'état d'imperfection où se trouve la physiologie, sous le point de vue de son étude philosophique, on n'est bien d'accord que sur l'existence d'une seule de ces forces : on la nomme contractilité.

Les caractères de la force unique qui compose encore cette troisième classe sont : 1° d'être temporaire, puisqu'elle ne se rencontre que pendant la vie; 2° de ne se développer que dans les êtres qui proviennent de génération; 3° de ne présenter aucune proportionnalité avec la masse ou les distances; 4° d'être variable et même intermittente

dans son action; 5° de ne pouvoir jamais être produite artificiellement.

On conçoit que toutes ces forces peuvent agir séparément ou en grand nombre, ou même simultanément dans un système de corps, et il est évident qu'un phénomène sera d'autant plus difficile à interpréter, 1° que les lois des forces qui le produisent seront moins bien connues; 2° que plus de forces agiront concurremment pour le produire; malheureusement ces deux genres de difficulté sont réunis dans les phénomènes de physiologie.

On a distingué les forces en force *morte* et force *vive*. On nommait force morte celle qui perd en apparence son effet en agissant sur un obstacle invincible; on nommait force vive celle qui produit un mouvement réel. Cette distinction n'est plus admissible, car nous verrons que toute force a son effet.

On a aussi donné le nom de force d'*inertie* à la résistance que tous les corps apportent à un passage du repos au mouvement: mais il est évident que cette force n'existe pas, et nous verrons que tous les phénomènes qui la simulent s'expliquent par la considération des masses.

Une autre idée qui se présente naturellement à côté de celle de force, est celle de résistance. Et, en effet, aussitôt que nous essayons d'appliquer notre force propre au mouvement d'un corps quelconque, nous éprouvons plus ou moins de difficulté à déplacer ce corps, et cette difficulté se nomme *Résistance*. Cependant, si l'on examine les différens cas où elle se présente, on voit qu'ils se réduisent à deux, savoir: l'existence d'une force opposée, et l'influence de la masse. Par exemple, si l'on essaie de soulever un corps, on éprouve une résistance qui dépend de la force de pesanteur du corps; et si l'on essaie de faire rouler une

boule sur un plan horizontal, auquel cas la pesanteur est nulle, on croit éprouver une résistance qui dépend de ce que notre force propre, partagée entre la masse de la main et celle de la boule, ne peut mouvoir ces deux masses réunies aussi vite que la main seule; en sorte que l'on peut dire que toute résistance se réduit à l'existence d'une force opposée. En mécanique, on est dans l'usage de nommer résistance la force qu'il s'agit de vaincre. Ainsi, dans l'exemple du poids qu'il s'agit de soulever, la force de la pesanteur est celle qui joue le rôle de résistance, et qui en porte le nom.

Quelle que soit la force que l'on examine, il y a en elle trois choses à considérer : 1° son intensité; 2° sa direction; 3° le temps pendant lequel elle agit.

32. L'intensité d'une force est exprimée par la quantité de mouvement qu'elle peut produire, et devient l'objet d'une mesure de ce mouvement. Cette mesure rentre dans la règle générale que nous avons établie (3) ; c'est-à-dire qu'elle se réduit à une comparaison que l'on établit avec une unité de force. Une force peut être plus grande ou plus petite qu'une autre; mais on est dans l'usage de comparer les forces à des unités conventionnelles. Ainsi un corps qui pèse autant qu'un décimètre cube d'eau, et que l'on nomme un kilogramme, est attiré par la terre avec une force qui est constante, et que l'on peut prendre pour terme de comparaison. On dira donc une force de 1, de 2, de 100, de 1,000 kilogrammes. On dit aussi la force d'un homme, la force d'un cheval, etc.

L'appréciation de la quantité de mouvement qu'une force peut produire n'est pas une chose aussi facile qu'on pourrait le croire au premier moment. En effet, si une force pouvait être appliquée à une seule particule de matière, la mesure de la quantité de mouvement serait exprimée par

l'espace que la force ferait parcourir à la molécule en un temps donné; mais les forces sont toujours appliquées à des *corps*, c'est-à-dire à des réunions de particules matérielles. Or, puisque toutes les particules du corps se meuvent en même temps et avec la même vitesse, il faut qu'elles se partagent l'effet de la force qui les meut; en sorte que chacune prendra d'autant moins de vitesse qu'elles seront plus nombreuses, et réciproquement. Si donc on suppose une force capable de mouvoir une seule particule de matière avec une vitesse comme 100, et que cette force se trouve appliquée à 10 particules de matière, la vitesse de chacune ne sera plus que 1/10 de 100 ou 10. D'où l'on peut conclure que, pour avoir la véritable quantité de mouvement imprimé par une force à un corps, il faut multiplier la vitesse qu'il prend par le nombre de molécules qui le composent. Mais ce nombre de molécules est inconnu et représenté par le poids ou la masse du corps; d'où il suit *que la quantité de mouvement est égale à la masse multipliée par la vitesse.*

Les prétendues forces mortes s'expliquent par ces considérations. En effet, si une force donnée, comme celle de l'homme, est employée à essayer de mouvoir un rocher qui tient à une montagne, il est évident qu'ici la masse est infinie, et que, par conséquent, la vitesse sera infiniment petite, c'est-à-dire que la masse restera en repos. Cependant il est évident que la force aura eu son effet suivant la loi générale; car si cette masse eût été en équilibre comme un vaisseau flottant sur la mer, cette petite force, en prolongeant son action, aurait fini par produire un mouvement sensible.

La prétendue force de l'inertie s'explique par les mêmes considérations. En effet, si la main représentant une masse comme 1 est mue par les muscles avec une force qui

puisse lui imprimer une vitesse comme 100, mais que cette main s'applique à mouvoir une masse comme 99, la nouvelle masse à mouvoir deviendra 100, la vitesse sera réduite à 1, et ce retardement produit dans le mouvement de la main représentera exactement une résistance de la part du corps, ou une force d'inertie.

On emploie fréquemment une expression en forme d'axiome, qui dit que *la réaction est égale à l'action.* Cette proposition découle naturellement de ce que nous avons dit, que toute résistance naissait d'une force opposée; car il ne peut arriver que trois cas dans l'action d'une force agissante contre une force résistante: 1° elles seront en équilibre et nécessairement égales; 2° la force agissante l'emportera, et il n'y aura d'employé de cette force que ce qui est nécessaire pour détruire la résistance, le reste mettra le corps en mouvement; 3° la résistance l'emportera, mais il n'y aura d'employé de cette force que ce qui est nécessaire pour détruire la force agissante, et le surplus maintiendra le corps en repos, ou le mouvera dans un sens opposé.

53. La direction est une chose fort importante à considérer dans les forces: l'attraction et la répulsion qui se retrouvent dans tous les corps de la nature paraissent souvent agir au milieu d'un corps dans toutes les directions à la fois; mais entre deux corps différens, et dans tous les cas où une seule force est en action, elle agit suivant une certaine ligne droite qui peut représenter elle-même la direction de la force; et lorsqu'un corps est sollicité par plusieurs forces, il se meut encore en une seule ligne droite, comme s'il était sollicité par une seule force, que l'on nomme alors *résultante.* Ainsi la direction des forces est toujours nécessairement rectiligne: s'il arrive qu'un corps sollicité par plusieurs forces décrive une courbe, on doit

regarder celle-ci comme composée d'un grand nombre de petites lignes droites. Si l'on considère la direction entre deux ou plusieurs forces, on voit que ces directions peuvent se trouver sur la même ligne droite, mais opposées; sur la même ligne, mais dans le même sens : on voit encore que ces directions, sans être sur la même ligne, peuvent être parallèles, opposées, ou dans le même sens; enfin, les directions des forces peuvent former des angles entre elles. Tous ces cas donnent lieu à des effets résultans, suivant des lois que nous exposerons bientôt.

Comme il arrive souvent que l'on représente ces forces par les lignes de leurs directions, il arrive aussi que l'on représente l'intensité de ces forces par les longueurs de ces lignes. En effet, les longueurs peuvent servir aussi bien que des nombres à exprimer des quantités relatives : ainsi une ligne de 10 centimètres représentera en intensité et en direction une force donnée, et une autre ligne de 20 centimètres représentera très bien une force double en intensité. Nous ferons usage de ces moyens pour concevoir les lois de l'équilibre et du mouvement.

34. Le temps pendant lequel une force agit sur un corps pour lui imprimer un mouvement influe considérablement sur le mouvement produit : le cas le plus simple est celui où une force agit sur un corps pendant un seul instant, comme le choc d'un marteau, ou le choc d'une bille sur un plan. C'est dans cette supposition simple que nous avons dit (30) que le mouvement était uniforme et rectiligne. Mais dans une foule de circonstances la force semble attachée aux particules du corps : telle est, par exemple, celle de la pesanteur, qui les sollicite sans cesse, en repos comme en mouvement; en sorte que lorsqu'elle a déjà produit un mouvement, elle ne cesse d'y ajouter à chaque instant; ce qui produit le mouvement uniformément accéléré

de la chute des corps. On suppose dans ce cas que la force unique et continue est remplacée par une suite d'impulsions; une semblable force se nomme *accélératrice.* Il peut encore arriver que la force accélératrice agisse pendant un certain temps, puis abandonne ensuite le corps à lui-même; c'est ce qui arrive dans un fusil, où la balle reçoit de l'impulsion tant qu'elle est dans le canon: il en est de même pour le pois lancé par une sarbacane, et pour la pierre lancée par une fronde. Dans ces différens cas, le mouvement s'accélère tant que l'impulsion dure, et devient ensuite uniforme.

Enfin il peut arriver qu'une force accélératrice, c'est-à-dire agissant incessamment sur un corps, soit elle-même variable en intensité, soit en plus, soit en moins. Le mouvement sera encore accéléré, mais cette accélération ne sera plus uniforme. On comprend les cas très nombreux de cette dernière espèce sous le nom général de *mouvemens variés.*

LOIS DE LA COMPOSITION DES FORCES.

35. Lorsque deux ou plusieurs forces sont appliquées simultanément ou successivement à un corps, il peut en résulter deux effets différens: le corps peut rester immobile, malgré l'action de toutes ses forces; ou le corps peut être mis en mouvement avec une vitesse et dans une direction variables. Le premier cas constitue ce que l'on nomme *Équilibre*, la partie de la mécanique qui s'en occupe se nomme *Statique.* Le second cas, dans lequel le corps est mis en mouvement, forme, avec toutes ces circonstances, la partie de la mécanique qu'on nomme *Dynamique.*

Les deux effets généraux dont nous venons de parler sont soumis à un certain nombre de lois simples et faciles à

concevoir qui permettent de prévoir et de calculer les effets dans tous les cas possibles. Nous allons exposer ces lois; mais pour plus de facilité et de clarté dans leur exposition, nous supposerons d'abord les différentes forces appliquées à des points matériels sans étendue, nous réservant de faire ensuite l'application de ces principes à la statique et à la dynamique des solides, des liquides et des fluides aériformes.

LOIS DE L'ÉQUILIBRE.

36. Si l'on suppose que plusieurs forces soient appliquées simultanément à un même point matérial, quelle que soit la variété d'intensité et de direction de toutes ces forces, ce point pourra rester immobile ou se mouvoir: mais s'il se meut, ce sera nécessairement dans une seule direction; car il répugne de supposer qu'un corps puisse se mouvoir à la fois dans deux directions différentes. S'il est vrai que le point matériel se meuve en effet, ou tende à se mouvoir dans une seule direction, il est toujours permis de supposer que ce corps, au lieu d'être mu par un grand nombre de forces, n'obéit qu'à une seule dans la direction indiquée. Cette force unique, qui peut ainsi remplacer toutes les autres, se nomme *résultante*, et les forces qu'elle remplace se nomment *composantes*. Il était nécessaire d'exposer d'abord le sens de ces expressions dont nous ferons usage à tout moment.

37. *Si un point matériel est sollicité par deux forces égales, et en sens directement opposés, ce point restera immobile et sera dans l'état que l'on nomme équilibre.* Mais il est essentiel de distinguer cet état de ce que l'on appelle *repos*. En effet, dans l'équilibre il suffirait de détruire ou de diminuer une des puissances qui agissent sur le point

matériel, pour qu'il se mît en mouvement, tandis qu'il faudrait appliquer une force nouvelle au point matériel en repos pour le déplacer. Le repos consiste dans l'absence de tout mouvement et de toute tendance au mouvement, et l'équilibre dans l'absence de tout mouvement, mais avec des tendances égales et opposées. D'où il résulte qu'il n'y a pas dans notre univers de repos absolu; ce que nous prenons pour tel est tout au moins un équilibre entre deux forces opposées, savoir, la pesanteur, qui tend à rapprocher les corps du centre de la terre, et la résistance, que le globe lui-même oppose à ce rapprochement.

38. *Lorsque deux forces inégales agissent en sens contraires sur un point matériel, la résultante est dans la direction de la plus grande; son intensité est égale à leur différence.*

39. *Lorsque deux forces agissent sur un point matériel dans le même sens, la résultante est dans leur direction, et son intensité est égale à leur somme.* Dans les deux cas, l'équilibre ne peut avoir lieu qu'en opposant une force égale et en sens contraire.

En général, lorsqu'un nombre de forces parallèles agissent les unes dans un sens et les autres en sens contraire, sur un point matériel, la résultante est égale à la différence des forces opposées, et sa direction est celle de la plus forte somme. L'équilibre est produit par une force égale et opposée à la résultante.

40. Lorsque deux forces sont appliquées à un même point matériel, et qu'elles ne sont ni parallèles ni opposées, c'est-à-dire qu'elles forment un angle entr'elles, elles tendent en partie à se détruire, et en partie à mouvoir le point matériel.

La résultante est représentée en grandeur et en direction par la diagonale d'un parallélogramme construit sur

les deux droites, représentant, par leurs directions et leurs longueurs, les deux forces composantes. En effet, soient C (*fig.* 1) le point matériel à mouvoir, CD la première force, et CE la seconde, le point C devra prendre un mouvement, puisque les deux forces ne sont pas directement opposées; et ce mouvement ne pouvant être à la fois dans la direction CD et dans la direction CE, il devra en suivre une différente et intermédiaire. En suivant cette direction, son écartement dans le sens CD devra être proportionnel à l'intensité de la force que cette ligne représente, et son écartement dans la direction CE devra être aussi proportionnel à l'intensité de cette seconde force. Or, si l'on mène par le point D une ligne DB parallèle à CE, le point où arrivera le corps doit se trouver sur cette ligne; et si d'une autre part on mène par le point E une ligne EB, parallèle à CD, le point où arrivera le corps devra aussi se trouver sur cette ligne EB. Cette opération géométrique forme précisément le parallélogramme dont nous avons parlé, et la diagonale CB représente en longueur et en direction la résultante des deux forces primitives, sa direction présentant le chemin que suivra le corps, et sa longueur l'intensité de la résultante, relativement à celles des deux forces primitives.

On peut dire encore qu'en supposant d'abord le point matériel abandonné à l'unique influence de la force CD, il arriverait au point D; et qu'en supposant ensuite que cette force, venant à cesser d'agir, le point matériel fût alors livré à la seule force CE, exactement représentée par la ligne DB qui lui est égale et parallèle, le point C se trouverait transporté au point B. Or le résultat doit être le même lorsque les deux forces agissent en même temps, puisque l'action de l'une ne saurait nuire à celle de l'autre et que la matière est inerte par elle-même; en

sorte que, dans l'un et l'autre cas, les deux puissances ont été également satisfaites, soit dans leur intensité, soit dans leur direction.

La proposition fondamentale que nous venons d'essayer de faire comprendre se démontre en mathématiques, aussi bien qu'elle résulte d'expériences directes que l'on peut répéter sur un billard de marbre avec une bille d'ivoire, que l'on frappe en même temps de deux marteaux convenablement dirigés et animés de vitesses connues.

L'équilibre sera obtenu, dans le cas que nous venons de citer, en appliquant au point CF une force égale à CB, et opposée en direction. Il faut remarquer que deux composantes données ne peuvent avoir qu'un seul résultat; mais qu'au contraire, une seule force étant donnée, on peut la remplacer par un nombre indéfini de paires de forces; car on peut la rendre diagonale d'un nombre indéfini de parallélogrammes divers, dont les côtés seront des composantes que l'on pourra indifféremment substituer à la force donnée: cet artifice est souvent employé, et les muscles des animaux en présentent des exemples nombreux.

41. On conçoit qu'il est facile d'obtenir, par la même méthode, la résultante commune d'un nombre indéfini de forces appliquées à un même point matériel. Soient, par exemple (*fig.* 2), les forces CA, CB, CD, CE, appliquées au point C : si l'on considère d'abord les deux forces CD et CB, on obtiendra leur résultante CF; on pourra dès lors supposer que les deux forces primitives sont remplacées par leur résultante. Combinant alors les deux forces CF et CA, on obtiendra leur résultante CG, qui, combinée elle-même avec la dernière force CE, donnera la résultante unique CH, à laquelle il suffira d'opposer une force égale CK, pour que le point C soit en équilibre. Cette proposi-

tion est générale, et s'applique également à un nombre quelconque de forces dirigées dans tous les sens autour du point matériel, et qui ne se trouveraient pas dans un même plan. En effet, dans la réduction du nombre des forces, on les considère toujours deux à deux: et deux lignes droites qui se rencontrent en un point sont nécessairement dans le même plan.

Un nombre quelconque de forces peut être appliqué à deux ou plusieurs points matériels liés entr'eux d'une manière invariable; la connaissance des lois suivant lesquelles les forces se combinent alors est d'autant plus importante qu'elle s'applique directement à la mécanique des corps solides.

Si l'on suppose deux points matériels écartés l'un de l'autre, mais invariablement unis, quel que soit le nombre des forces appliquées à ces deux points, on pourra toujours les réduire, par les règles précédentes, à une seule résultante pour chaque point matériel. Mais alors il pourra arriver trois cas différens: 1° ces deux résultantes seront parallèles; 2° elles ne seront pas parallèles, mais elles seront dans le même plan; 3° elles ne seront pas parallèles et ne seront pas dans le même plan.

42. *Forces parallèles. — Lorsque deux forces parallèles agissent dans le même sens sur deux points matériels liés entr'eux, leur résultante est égale à la somme de ces deux forces, et passe par un tel point de la ligne qui les sépare, que les deux parties de cette ligne se trouvent réciproquement proportionnelles à l'intensité des deux composantes.*

Soient (*fig.* 3) A et B les deux points matériels unis par la ligne AB, soient AD et BE les deux forces parallèles: la résultante sera CF, la longueur de cette ligne sera égale à la somme des longueurs AD et BE; le point C sera placé

de manière que l'on aura AC : BE : : CB : AD, c'est-à-dire que la partie AC sera d'autant plus grande que l'intensité de la force BE sera plus considérable, et que la ligne CB sera d'autant plus petite que l'intensité de la force AD sera moindre : en sorte que si AD était double de BE, CB serait double de AC. La même proposition s'exprime encore en disant que les produits de la valeur des forces, multipliés par leur distance au point par où passe la résultante, sont égaux, en sorte que l'on a $AC \times AD = BE \times CB$. On voit que, pour faire équilibre aux deux forces AD et BE, il faudrait appliquer au point C une force égale et opposée à CF.

Nous avons supposé les deux forces perpendiculaires à la direction de la ligne AB ; mais les résultats seraient exactement les mêmes si les forces étaient obliques, mais toujours parallèles, comme dans la *fig.* 4.

43. *Si deux forces parallèles sont appliquées à deux points matériels unis invariablement, que les forces soient inégales et leurs directions opposées, la résultante sera égale à leur différence, sera dans le sens de la plus forte, et passera par un point qui se trouvera situé au delà de la ligne qui joint les deux points matériels du côté de la plus grande force; et les distances des points d'action seront réciproquement proportionnelles aux forces.*

Soient (*fig.* 5) A et B deux points matériels, AD et BE deux forces parallèles, inégales et opposées : la résultante sera CF ; sa longueur égalera la différence des deux lignes AD et BE, et les distances AC et BC seront réciproquement proportionnelles aux forces AD et BE.

On obtiendra l'équilibre, en appliquant au point C une force égale et opposée à CF.

Il faut remarquer que, dans le cas de deux points matériels, lorsque les deux forces sont égales et opposées, il ne peut pas y avoir de résultante unique, et qu'on ne

pourrait obtenir l'équillibre qu'en opposant à ces deux puissances deux autres forces égales. Ces deux forces parallèles et opposées portent le nom de *couple*. Elles présentent une sorte de résultat que l'on obtient quelquefois en cherchant à réduire un grand nombre de forces à leur résultante. On reconnaît par là même qu'il n'y a pas de résultante unique possible, et l'on observe que l'on peut changer à volonté la direction de ce couple, soit dans le même plan, soit même dans les plans différens, sans modifier l'action des deux forces.

Les règles que nous venons de donner suffisent pour trouver, quand elle existe, la résultante d'un nombre indéfini de forces parallèles agissant sur un nombre indéfini de points matériels invariablement liés; car on peut toujours considérer deux à deux, soit les points matériels, soit les puissances qui leur sont appliquées.

44. *Centre des forces parallèles.* — Si des forces parallèles en nombre quelconque sont appliquées à des points matériels, leur résultante passera par un point qui ne changera jamais, quelle que soit la direction nouvelle que l'on donne à l'ensemble de toutes les forces, en conservant leur parallélisme, et c'est ce point que l'on nomme *centre des forces parallèles.*

45. *Forces non parallèles et dans le même plan.* — *Lorsque deux forces non parallèles sont appliquées à deux points matériels invariablement unis, on trouve leur résultante en prolongeant les directions de ces forces jusqu'à ce qu'elles se rencontrent, et en construisant le parallélogramme des forces, comme si elles étaient effectivement appliquées au point de rencontre, et qu'il fût invariablement uni aux deux points matériels.*

Soient (*fig.* 6) les deux points A et B, et les deux forces convergentes AD et BE : si l'on prolonge leurs direc-

tions, elles se rencontreront au point O, et l'on obtiendra la diagonale OH, qui coupera la ligne AB dans le point C, auquel devra être appliquée la résultante, en lui donnant la longueur CQ, égale à OH.

Il est remarquable que le point C est situé de manière que si de ce point on mène les perpendiculaires Ca et Cb aux directions des forces, ces deux lignes se trouveront réciproquement proportionnelles aux forces; en sorte que si l'on multiplie chaque force par sa perpendiculaire, on aura des produits égaux, c'est-à-dire $BE \times Cb = AD \times Ca$. Ce produit de la force par la perpendiculaire, à l'extrémité de laquelle elle est censée agir, se nomme le *moment* des forces.

On peut juger, par la seule inspection de la figure, que plus la force BE sera oblique, relativement à la ligne AB, plus la ligne Cb sera petite, plus le moment de la force où son énergie diminuera. En effet, si la force était dans la direction de AB, la ligne Cb serait réduite à zéro : or la force multipliée par zéro serait réduite à zéro ou son action deviendrait nulle. Au contraire, si la force BE est perpendiculaire à AB, Cb est égal à CB, et c'est le maximum de sa grandeur; c'est aussi le cas où le moment de la force est le plus grand possible.

On pourra réduire ainsi à une seule résultante un nombre indéterminé de forces non parallèles, en les composant deux à deux.

46. *Forces non parallèles et dans divers plans.* — Il peut arriver que plusieurs points matériels liés entr'eux soient sollicités par un nombre indéterminé de forces dans toutes sortes de directions : le problème de la composition de toutes ces forces, ou la détermination de leur résultante, se complique; mais on le simplifie en considérant que toutes ces forces peuvent se changer en d'autres qui seraient contenues dans deux plans perpendiculaires l'un

à l'autre. En effet, si l'on prolonge dans le sens convenable chacune de ses forces, elles iront nécessairement tomber sur l'un de ces deux plans perpendiculaires l'un à l'autre; on pourra dès lors les considérer comme appliquées aux points mêmes où ces directions touchent les plans, en supposant ces points liés aux premiers points matériels: mais une force qui touche obliquement un plan peut toujours être remplacée par deux forces composantes, l'une parallèle et l'autre perpendiculaire au plan, ces deux forces nouvelles formant les côtés d'un parallélogramme dont la première force est la diagonale; et comme cette opération peut être faite pour chaque force, elles se trouveront enfin toutes comprises dans deux plans perpendiculaires l'un à l'autre.

Les règles que nous avons données précédemment apprennent à composer les deux nouveaux systèmes de forces dans chacun des plans qui les renferment; mais il peut arriver 1° que chaque plan donne une résultante unique; 2° que l'un des systèmes donne une résultante unique, et l'autre un couple de forces; 3° que chaque système donne un couple de forces.

Dans le premier cas, si ces deux résultantes sont dans le même plan, elles se réduisent à une seule; si elles sont dans des plans différens, elles n'auront point de résultante commune, puisqu'on ne peut pas, en les prolongeant, les faire rencontrer. Dans le second cas, la résultante unique et le couple de forces se réduiront à deux forces qui ne seront pas dans le même plan et qui ne sauraient se réduire à une seule.

Dans le troisième cas, les deux couples se réduiront à un seul, et n'auront conséquemment point de résultante unique.

Les règles que nous venons de donner, en fournissant

les résultantes d'un nombre quelconque de forces dans toutes les directions possibles, donnent en même temps le moyen de produire l'équilibre en opposant à cette résultante une force égale.

Ces mêmes règles, en les appliquant aux corps solides, liquides ou gazeux, donnent la *statique* de ces différens corps, comme nous le verrons par la suite.

LOIS DU MOUVEMENT.

47. Un point matériel sollicité par une force ou par la résultante d'un nombre quelconque de forces se meut dans l'espace en ligne droite. Nous avons vu qu'il y avait à considérer dans ce fait général l'espace parcouru, le temps, la vitesse constante, variable, ou uniformément variable, et la quantité de mouvement. Nous devons maintenant exposer les lois qui régissent les différentes sortes de mouvement.

48. *Mouvement uniforme.* — On sait que nous nommons ainsi le mouvement dans lequel un point matériel parcourt des espaces égaux dans des temps égaux; ce cas arrive lorsque le mouvement est produit par une force qui cesse d'agir. Nous disons que ce cas arrive, seulement par abstraction, car dans la nature il y a toujours quelque obstacle qui diminue peu à peu le mouvement et le réduit bientôt à rien; en sorte que le mouvement perpétuel, qui est dans l'essence des choses, n'est qu'une chimère en pratique.

49. *Dans le mouvement uniforme la vitesse est proportionnelle à la force.* Nous n'avons aucun moyen de prouver directement cette proposition, puisque nous ne connaissons les forces que par les effets qu'elles produisent ou par le mouvement lui-même; mais il n'y a rien contre cette proposition, et nous pouvons l'adopter, du moins comme une supposition permise.

50. *Dans le mouvement uniforme la vitesse est égale à l'espace divisé par le temps.* En effet, le temps se mesure, comme toute autre chose, par comparaison avec une unité fixe et conventionnelle; *la seconde,* par exemple, est l'unité de temps dont on fait usage: ainsi *le temps*, c'est le nombre ou la fraction de seconde qui s'est écoulé.

La vitesse, c'est l'espace parcouru pendant une unité de temps ou une seconde: ainsi, supposant qu'un corps se soit mu pendant trente secondes, et qu'il ait parcouru soixante mètres, on aura sa vitesse en divisant soixante mètres, qui est l'espace, par trente secondes, qui est le temps, et on aura pour résultat un quotient 2, qui indique que la vitesse est de deux mètres par seconde.

C'est un principe de mathématiques, évident pour le simple bon sens, que des quantités de nature différente ne peuvent être ni ajoutées, ni retranchées, ni multipliées, ni divisées; c'est ainsi qu'on ne peut pas ajouter deux pintes de liquide avec dix onces, ni diviser cent kilogrammes par dix mètres: cependant, dans l'exemple qui précède et dans une foule d'autres cas qui se représenteront par la suite, nous divisons soixante mètres ou l'espace par trente secondes ou le temps: mais il faut remarquer que le temps et l'espace ne sont rien de positif par eux-mêmes, et que les expressions *soixante mètres* n'expriment autre chose que le rapport de l'espace parcouru avec un autre espace qu'on nomme mètre; de même que les expressions *trente secondes* n'expriment autre chose que le rapport d'un temps écoulé avec un autre temps qu'on nomme seconde, en sorte que ce sont deux expressions de rapport que l'on divise l'une par l'autre, et non pas deux quantités de nature différente.

En désignant par des lettres les objets dont nous venons de parler, en appelant, par exemple, v la vitesse, t le temps, e l'espace, on a l'équation simple $e=vt$, qui veut

dire que l'espace est égal à la vitesse multipliée par le temps; et l'on en tire $v=\frac{e}{t}$, qui exprime que la vitesse est égale à l'espace divisé par le temps; et enfin $t=\frac{e}{v}$, ce qui veut dire que le temps écoulé s'obtient en divisant l'espace parcouru par la vitesse: d'où l'on voit qu'entre les quantités temps, espace et vitesse, on peut toujours déterminer l'une quand on connaît les deux autres.

51. *Mouvement uniformément accéléré.* — Nous avons défini ce mouvement en disant que dans chaque unité de temps la vitesse s'accroissait d'une quantité égale; nous avons dit que ce mouvement était produit par une force constante et agissant sur le point matériel d'une manière permanente; et nous avons vu que cette action permanente pouvait être représentée par une série d'impulsions égales, se répétant à chaque instant et à des intervalles infiniment petits. En admettant que chaque nouvelle impulsion produise dans le corps une vitesse égale, et en nommant g cette vitesse, on voit qu'après le premier temps, infiniment petit, la vitesse sera $1\,g$; dans le second temps, $2g$, et successivement $3g$, $4g$, etc. Le nombre total des instans pendant lesquels la force agit peut être représenté par t, et alors le dernier terme de la série que nous supposons sera tg, qui représentera la vitesse au bout du temps pendant lequel la force aura agi. Mais si l'on considère que les instans dont nous avons parlé sont infiniment petits, on concevra qu'il y en aura un nombre infini dans le temps déterminé que nous avons nommé t.

Dans cette série de vitesses qui croissent régulièrement, l'espace parcouru doit se trouver le même que si la vitesse

eût été constante et égale à la moyenne de toutes les vitesses différentes; cette moyenne est $\frac{1}{2}gt$. Or nous savons que l'espace parcouru est égal à la vitesse multipliée par le temps : si nous multiplions donc $\frac{1}{2}gt$. par t, nous aurons $\frac{1}{2}gt^2$, qui exprimera l'espace parcouru pendant le temps t. Comme, dans cette expression $\frac{1}{2}gt^2$, g peut souvent être considérée comme constante, on en conclut que pour deux corps qui se meuvent par l'effet d'une même force accélératrice, les espaces parcourus sont comme les carrés des temps.

Ainsi *les espaces parcourus avec des vitesses uniformément accélérées sont égaux à la moitié de la vitesse multipliée par le carré du temps*, ce qui donne $e=\frac{1}{2}gt^2$.

52. Lorsqu'une force accélératrice a exercé son action pendant un certain temps sur un point matériel, et que cette action cesse, ce point matériel doit rester animé de la vitesse qu'il avait dans le dernier instant, et qui est exprimée par gt; c'est ce qu'on nomme *vitesse finale*. Mais si l'on suppose que le corps continue à se mouvoir avec cette vitesse, qui sera dès lors uniforme, l'espace parcouru dans un temps donné sera exprimé par la vitesse multipliée par le temps ou vt. Or nous savons que la valeur de v est alors gt, nous aurons donc $gt \times t$ ou gt^2. Or gt^2 étant le double de $\frac{1}{2}gt^2$, qui exprime l'espace parcouru pendant la durée du mouvement accéléré, il en résulte la loi suivante :

La vitesse finale acquise par un corps qui a été mu d'un mouvement uniformément accéléré pendant un temps donné, est capable de faire parcourir à ce corps d'un mouvement uniforme un espace double pendant un autre temps égal.

53. On observe dans les mouvemens uniformément accélérés cette circonstance particulière, que les espaces parcourus pendant chacun des temps successifs du mouve-

ment, pendant chaque seconde, par exemple, sont entre eux comme les nombres impairs 1, 3, 5, 7, etc. En effet, l'espace parcouru pendant les deux premières secondes sera le carré de 2 ou 4; mais si l'on en retranche l'espace parcouru pendant la première seconde, qui est 1, il restera 3 pour l'espace parcouru pendant le second temps. En trois secondes, l'espace parcouru sera 9, carré de 3; et si l'on en retranche l'espace parcouru pendant les deux premières secondes, c'est-à-dire 4, il restera 5: et ainsi de suite pour tous les autres temps successifs, parce que la différence des carrés des nombres naturels donne la série des nombres impairs.

Lorsqu'un corps, au moment où une force accélératrice s'empare de lui, était déjà doué d'une vitesse uniforme dans le même sens, il faut ajouter dans chaque temps du mouvement l'espace que le corps aurait parcouru en vertu du mouvement uniforme dont il était précédemment animé.

54. *Mouvement uniformément retardé.* — Si l'on suppose qu'un corps soit doué, dans un sens déterminé, d'une vitesse uniforme, et qu'il vienne à recevoir l'impulsion d'une force accélératrice en sens contraire, sa vitesse primitive sera successivement et uniformément retardée par l'effet de la force opposée, comme elle était accélérée dans le cas précédent. Si l'on nomme a la vitesse uniforme du corps, et qu'on cherche sa vitesse au bout d'un temps quelconque t, on trouvera qu'elle est égale à la vitesse primitive, moins la vitesse finale du mouvement accéléré; c'est-à-dire qu'on aura $v=a-gt$. Il en sera de même pour les espaces: celui que le corps aurait dû parcourir avec son mouvement uniforme aurait été at; celui que la force accélératrice aurait dû lui faire parcourir en sens contraire aurait été $\frac{1}{2}gt^2$: on aura donc $e=at-\frac{1}{2}gt^2$.

On conçoit que dans cette supposition il arrivera un mo-

ment où le mouvement uniforme du corps sera complètement détruit; et si la force accélératrice cessait alors d'agir, le corps resterait en repos. Mais si elle continue son action, le corps prendra un mouvement uniformément accéléré, en retournant dans la même ligne qu'il avait parcourue; et quand il sera arrivé au point de départ, il se trouvera animé d'une vitesse finale, égale à la vitesse constante qu'il avait en partant, mais en sens contraire.

55. *Mouvemens variés.*—Si la force accélératrice, au lieu de rester constante, comme nous l'avons supposé, pour produire le mouvement uniformément accéléré, vient à subir elle-même des augmentations ou des diminutions, le mouvement éprouvera aussi des modifications qui tiendront à la loi suivant laquelle la force accélératrice variera, et que l'on détermine par des méthodes qu'il n'est point de notre objet d'exposer ici.

56. *Mouvement curviligne.*— Nous avons vu qu'une seule force, agissant pendant un seul moment sur un point matériel, produisait un mouvement uniforme et *rectiligne*; qu'une seule force agissant continuellement dans la même direction sur un point matériel produisait un mouvement accéléré, mais toujours rectiligne; enfin, que plusieurs forces agissant toutes pendant un seul moment, ou toutes pendant un temps égal, sur un même point matériel, produisaient un mouvement composé dans le sens de la résultante et en ligne droite.

Pour donner lieu au mouvement *curviligne*, ou pour faire parcourir à un point matériel une ligne courbe quelconque, il faut que la force unique qui meut ce point matériel change de direction, ou bien que l'une des forces qui meuvent ce point matériel change d'intensité; ou enfin que l'une des forces produise un mouvement uniforme, et l'autre un mouvement varié.

Si l'on conçoit une force quelconque qui agisse sur un point matériel pendant un instant, et que l'on suppose que dans l'instant suivant cette force change de direction, les deux espaces parcourus seront exprimés par deux lignes qui feront un angle entre elles. Ainsi la force FC (*fig.* 7) fera parcourir dans le premier moment l'espace CC′, et la même force dans la direction FC′ fera parcourir dans le second temps l'espace C′ C″, et dans le troisième temps l'espace C″ C‴.

Ainsi les lignes exprimant les espaces parcourus représenteront un polygone dont la forme dépendra de l'intensité de la force et de la loi de son changement de direction; et si l'on suppose que le changement de direction ait lieu à chaque instant infiniment petit, les côtés du polygone deviendront eux-mêmes infiniment petits et l'espace parcouru sera une courbe.

Si l'une des deux forces agissant sur le même point matériel diminuait ou augmentait à chaque instant, leur résultante commune changerait aussi à chaque instant de direction; ce qui rentre, comme on voit, dans le cas précédent.

De deux forces agissant sur un point matériel, l'une peut agir pendant un seul moment et produire un mouvement uniforme, tandis que l'autre agit continuellement et produit un mouvement accéléré. Il résultera de ces deux mouvemens combinés une courbe, dont la nature dépendra de leur rapport.

Supposons (*fig.* 8) un point matériel A, qui reçoive à la fois l'impulsion de deux forces, savoir la force CA, agissant sur lui pendant un seul moment comme l'effet de la poudre sur une bombe, et capable de lui faire parcourir dans des temps égaux et dans la direction AF des espaces

égaux Aa, aa', $a'a''$, etc.; et en second lieu, la force DA agissant sur lui d'une manière continue, comme le ferait la pesanteur, et capable de lui faire parcourir, dans des temps égaux et dans la direction AE, des espaces Ab, bb', $b'b''$, $b''b'''$, etc., suivant la loi des forces accélératrices, c'est-à-dire de manière que les espaces soient comme la série des nombres impairs.

Si nous considérons l'action des forces pendant le premier moment, nous trouverons que, pour déterminer le point où le corps devra se trouver, il faudra construire le parallélogramme des forces $A\,a\,m\,b$, et que le point m sera le lieu où le point matériel devra se trouver après le premier moment, On déterminera de la même manière les points m', m'', m''', etc.; et si on réunit ces points par une ligne qui se trouvera composée de petites lignes formant des angles, cette ligne sera une *parabole.*

C'est à peu près la courbe produite par un projectile lancé obliquement de la surface du globe, et sollicité en même temps par la pesanteur.

On conçoit que nous n'avons choisi ici qu'un seul exemple remarquable entre toutes les variétés de mouvemens curvilignes qui peuvent être produits par des circonstances analogues.

Il est un cas particulier, trop important pour ne pas nous en occuper avec quelques détails; c'est celui où la force accélératrice constante est toujours dirigée vers un même point, malgré le déplacement continuel du point matériel.

57. Le mouvement circulaire est produit par une disposition de ce genre.

Supposons, en effet (*fig.* 9), un point matériel A, sollicité par une force D A et par une force B A, à laquelle la première reste toujours perpendiculaire. Dans le pre-

mier moment, l'action simultanée de ces deux forces conduira le point matériel au point m; mais, arrivée dans ce point, la direction de la force B A sera changée et sera devenue B m, les deux forces tendant également au point C; le point mobile sera donc porté, dans l'instant suivant, au point m'. En continuant ainsi à construire les petits parallélogrammes des forces pour chacun des instans du mouvement, on aura une suite de lignes droites, qui formeront un polygone régulier autour du centre C, et la force B C se sera trouvée située successivement dans tous les rayons de ce polygone. Si les temps d'actions sont infiniment petits, ce polygone sera un cercle.

On représente d'une manière simple le cas du mouvement circulaire, en attachant un corps à un point fixe par un fil, et lui imprimant une impulsion perpendiculairement à la direction de ce fil. Il est évident que, dans ce cas, la résistance du fil représente une force constamment dirigée vers le point C, et qui prend alors le nom de force *centripète*. En sorte que l'on pourrait remplacer la résistance du fil par une force constante, normale ou perpendiculaire à la tangente de chaqne point de la circonférence du cercle.

La tension même qu'éprouve le fil, de la part du corps, dans ce mouvement de rotation, porte le nom de *force centrifuge*.

Les mêmes choses arriveraient exactement, si le point matériel se mouvait dans l'intérieur d'une courbe solide circulaire. La résistance de la courbe représenterait celle du fil, ou la force normale nécessaire pour retenir le point matériel dans la courbe, et la pression du corps sur la courbe, la force centrifuge.

58. Le mouvement des corps sollicités par une force d'impulsion et par une force centripète est soumis à une

série de lois qui ont été déterminées par l'observation et par le calcul, et que nous nous contenterons d'indiquer ici.

1° *Les aires ou les surfaces décrites par le rayon vecteur (ou par la ligne qui joint le mobile au point fixe) sont proportionnelles aux temps employés à les décrire.*

2° *Lorsque la force centripète est en raison simple de la distance du mobile au point fixe, la courbe décrite est une ellipse dont le centre se trouve au point fixe.*

3° *Lorsque la force centripète est en raison inverse du carré de la distance du mobile au centre, la courbe décrite est une ellipse, une parabole ou une hyperbole, dont le point fixe occupe un des foyers.*

4° *Si plusieurs mobiles décrivent des ellipses suivant la dernière loi, les carrés des temps de leurs révolutions sont comme les cubes des grands axes des ellipses.*

Ces lois s'appliquent aux mouvemens des corps célestes, fournissent toutes les solutions des problèmes qui y sont relatifs, et en reçoivent par conséquent la confirmation la plus absolue.

Lorsqu'un corps se meut dans une courbe quelconque, si l'on suppose que la force accélératrice ou centripète vienne à cesser tout à coup son action, le corps devra continuer à se mouvoir suivant la direction de la petite ligne droite qu'il parcourait dans cet instant, et par conséquent sa course sera désormais rectiligne, et suivant la tangente de la courbe qu'il parcourait précédemment. C'est ce que l'on remarque dans le mouvement circulaire d'un corps retenu par un fil à un point fixe; si ce fil se rompt ou que le corps s'en détache, il suit la tangente au cercle dans le point même où le fil s'est rompu. C'est ainsi que les corps solides sont lancés par la fronde.

La vitesse tangentielle du corps est égale à celle qu'il avait dans la courbe même, au moment où il l'a quitté.

Cette vitesse est égale à l'espace qu'il parcourait, dans un temps infiniment petit, divisé par ce temps. On trouve encore la vitesse d'un corps parcourant une courbe, en supposant toutes les puissances anéanties et divisant l'espace parcouru suivant la tangente par le temps, comme pour tout autre mouvement uniforme.

La tendance d'un point matériel à s'échapper par la tangente quand il se meut dans une courbe, produit ce que nous avons appelé la force centrifuge; il est évident qu'elle doit croître dans une certaine proportion avec la vitesse du corps dans la courbe, et qu'elle doit être aussi modifiée par les différentes longueurs du rayon, puisque la tangente d'un cercle, par exemple, s'éloigne d'autant plus vite de sa courbe que le rayon est plus petit. Aussi démontre-t-on par le calcul que la force centrifuge est égale à $\frac{v^2}{r}$, c'est-à-dire au carré de la vitesse divisé par le rayon. Il est clair que la force centripète doit toujours être exactement égale et opposée à la force centrifuge, pour que le mobile soit maintenu dans la courbe que nous avons supposée. On trouve un autre mode d'appréciation de cette force centripète, car Huyghens et Newton ont démontré qu'elle *pouvait faire parcourir au mobile, dans un temps donné, un espace égal au carré de l'arc décrit dans le même temps, divisé par le diamètre du cercle.*

La première expression qui est double de la seconde exprime la vitesse finale, ou celle que la force peut produire dans l'unité de temps; la seconde mesure l'espace parcouru pendant ce temps.

Dans les courbes autres que le cercle, c'est encore par la tangente que le corps tend à s'échapper; la force centrifuge est toujours perpendiculaire à la tangente au point de la

courbe où se trouve le corps. Elle est toujours proportionnelle au carré de la vitesse ; mais elle est modifiée par le plus ou moins de courbure des différens points de la courbe, en sorte qu'elle dépend du rayon du cercle osculateur, c'est-à-dire de celui qui est le plus près de se confondre avec la courbe dans le point dont il est question. On obtient donc l'expression de cette force en divisant le carré de la vitesse par le rayon du cercle osculateur.

Dans tout ce que nous avons dit sur le mouvement curviligne, nous n'avons supposé que deux forces agissantes. On conçoit qu'elles peuvent être en plus grand nombre, et qu'il faudrait alors chercher leurs résultantes. Dans le mouvement circulaire, nous avons supposé la force d'impulsion perpendiculaire au rayon : si elle était oblique, on la décomposerait en deux autres, dont l'une, suivant la direction même du rayon, diminuerait ou augmenterait la force centripète, tandis que l'autre serait perpendiculaire au rayon, ce qui rentre dans le cas examiné.

Si les forces étaient variables, il pourrait en résulter une multitude de mouvemens divers et variés.

Nous devons faire remarquer ici que dans beaucoup de circonstances un très grand nombre de points matériels décrivent simultanément des cercles autour d'une ligne ; c'est ce qui arrive dans la rotation d'un corps sur son axe. Mais on conçoit que les règles précédemment données s'appliquent très aisément à la solution de ce problème, en apparence très compliqué, puisque chaque point matériel a sa vitesse propre, qui dépend de sa distance à l'axe, ou du rayon du cercle qu'il est forcé de décrire dans le même temps que tous les autres.

CHAPITRE III.

DES FORCES OU PUISSANCES NATURELLES.

59. Nous avons considéré en général l'étendue, la matière et ses différens états qu'on nomme corps; nous avons reconnu que la matière, inerte par elle-même, ne pouvait produire les phénomènes qui se répètent sans cesse autour de nous qu'à cause de certaines *forces* ou *puissances* qui agissent sur elle et la mettent en mouvement. Nous avons étudié en général la force ou la puissance; nous avons recherché sa nature, son mode d'action et les lois auxquelles cette action était constamment soumise; nous avons par conséquent passé en revue les différens cas d'équilibre ou de mouvement. Nous devons maintenant étudier successivement la nature particulière de chacune des différentes puissances qui agissent sur la matière et la mettent en mouvement ou la tiennent en équilibre.

L'esprit de l'homme, naturellement investigateur, a dû rechercher de tout temps la cause des grands phénomènes qui l'entourent. Le petit nombre des notions acquises, la fertilité de l'imagination qui devance toujours les résultats de l'expérience, ont dû produire beaucoup de vaines suppositions avant que l'on pût arriver à quelque découverte positive sur les causes des grands effets de la nature. Aussi les tourbillons de Descartes entraînant les astres dans leur rotation, sans qu'on s'inquiétât de ce qui mettait en mouvement les tourbillons eux-mêmes, ont précédé de longtemps la découverte de l'attraction.

Dans l'état actuel des connaissances naturelles et mathématiques, on peut se rendre compte de tous les phéno-

mènes physiques, en admettant l'existence d'un très petit nombre de forces soumises à des lois tellement fixes et déterminées, qu'il est presque toujours possible de prévoir ou même de calculer leurs effets.

Les forces étant classées comme nous l'avons fait (31), nous allons étudier chacune de ces puissances en particulier.

DE L'ATTRACTION.

60. Toutes les particules de la matière composant les corps qui sont à notre disposition tendent à se rapprocher les unes des autres; et, par exemple, si une partie quelconque de la masse du globe est écartée de sa surface, puis abandonnée à elle-même, elle s'en rapproche aussitôt jusqu'à ce qu'elle vienne de nouveau reposer sur cette surface. Deux corps polis que l'on applique l'un sur l'autre, adhèrent bientôt fortement: deux gouttes de mercure que l'on rapproche, se réunissent pour n'en former qu'une; un acide et un alcali que l'on mêle, se combinent de façon qu'il devient ensuite très difficile de les séparer l'un de l'autre. Tous ces phénomènes et un grand nombre d'autres dont la nature est moins évidente ont été long-temps tout à fait inexpliqués ou très mal compris. Isaac Newton conçut le premier l'idée la plus générale et la plus importante qui depuis l'origine des sciences naturelles ait éclairé leur marche. Il imagina que toutes les particules matérielles étaient animées d'une sorte de force ou puissance, en vertu de laquelle ces molécules tendaient à se rapprocher, et se rapprochaient en effet, quand elles ne rencontraient point d'obstacles insurmontables. Il fit plus, il reconnut et il démontra que cette force était exactement la même pour toutes les particules matérielles qui peuvent exister

dans l'univers; qu'en conséquence les corps qui pouvaient être entraînés par cette force, l'étaient d'autant plus puissamment qu'ils se trouvaient composés d'un plus grand nombre de particules matérielles, c'est-à dire que *cette force était proportionnelle aux masses;* enfin que les particules ainsi attirées les unes vers les autres, l'étaient d'autant plus qu'elles étaient plus rapprochées, et d'autant moins qu'elles étaient plus éloignées, et cela exactement *en raison inverse du carré des distances*, de sorte que l'attraction devenait quatre fois plus forte à une distance moitié moindre, et quatre fois plus faible à une distance double.

Avant de démontrer l'existence de ces lois, il est important de rappeler ici la pensée de Newton tout entière. Il n'a point prétendu, par l'usage du mot *attraction*, déterminer qu'un corps eût en effet en lui la faculté d'en attirer un autre, et d'agir par conséquent sur lui à distance et sans contact; ce qui paraîtrait impossible à comprendre. Il n'a pas prétendu non plus, quoiqu'il ait fait usage du mot *impulsion*, que les corps fussent effectivement chassés les uns vers les autres par une puissance extérieure: il n'a voulu exprimer, par les mots dont il s'est servi, qu'un fait général, savoir que les corps s'approchaient ou tendaient à s'approcher les uns des autres, comme s'il y avait entre eux une force d'attraction, ou comme s'ils étaient poussés par des impulsions. Il a établi la généralité du fait; il en a étudié les circonstances, qu'il est parvenu à réduire à une loi très simple, et il s'est servi des mots *attraction*, *gravité*, *gravitation*, pour faciliter et éclaircir son langage. Il sera probablement à jamais impossible de déterminer la cause réelle qui produit le rapprochement des corps, et toutes les explications imaginées par Gassendi, Descartes, Bulfinger, Huyghens, Perrault, Bernouilli, n'ont fourni aucune idée nette sur ce sujet, et méritent d'autant moins

d'être rappelées et discutées, que la véritable cause de l'attraction nous est aussi indifférente à connaître qu'il nous importe d'en bien apprécier les lois.

On donne à l'attraction des noms particuliers, suivant les circonstances dans lesquelles elle s'exerce et le genre d'effets qu'elle produit. On la nomme *gravitation,* ou *attraction planétaire*, lorsqu'elle s'exerce entre les globes qui composent notre système planétaire. On la nomme *pesanteur,* ou *attraction terrestre*, quand elle sollicite les corps sublunaires ou situés à la surface de notre globe. On la nomme *adhésion*, quand elle retient en contact deux corps différens et d'un petit volume. On la nomme *cohésion* ou *attraction d'agrégation*, quand elle maintient les particules d'un même corps dans leurs situations respectives. Enfin, on la nomme *affinité*, ou *attraction de composition*, lorsqu'elle réunit des particules matérielles de nature différente, et qu'elle en change les propriétés. Nous allons étudier successivement l'attraction dans ces différentes circonstances.

DE L'ATTRACTION PLANÉTAIRE.

61. Si l'on considère que la lune se meut uniformément dans un espace vide; que ce mouvement ne peut être dû qu'à une impulsion qu'elle a reçue dans l'origine des temps; si l'on se rappelle que tout mouvement semblable est toujours rectiligne de sa nature, et qu'au contraire la lune décrit une courbe elliptique autour de la terre, on sera forcé d'admettre qu'il y a une puissance centripète qui retient la lune dans cet orbite et qui l'empêche de s'échapper par la tangente de cette courbe; ce que l'on exprime en disant que la terre *attire* la lune. Ces propositions suffisent pour mettre hors de doute *l'existence* de l'attraction

entre tous les corps célestes, puisque les mêmes raisonnemens s'appliquent aux planètes qui circulent autour du soleil, aussi bien qu'aux satellites qui peuvent circuler autour d'elles.

Le même exemple peut servir à démontrer que cette force d'attraction s'exerce en raison inverse du carré des distances. En effet, la distance de la lune à la terre étant d'environ 60 rayons terrestres, si l'attraction suit effectivement cette loi, elle doit agir sur la lune avec une puissance 3600 fois moindre qu'à la surface du globe. C'est, en effet, ce que l'expérience et le calcul confirment; car, d'une part, un corps placé à la surface du globe tombe sur la terre de 15 pieds en une seconde, et par conséquent il tomberait de 3600 fois 15 pieds en une minute, puisque les espaces parcourus sont comme les carrés des temps, qu'il y a 60 secondes dans une minute, et que 3600 est le carré de 60. Et Newton a démontré que la lune, si elle était en repos, tomberait vers la terre avec une vitesse d'environ 15 pieds par minute. On peut déduire cette proposition de considérations assez simples. En effet; soit AC (*fig.* 10) le rayon de l'orbite de la lune, soit AD un arc de cet orbite que la lune décrive en une minute; le petit sinus verse A*a* sera nécessairement l'espace que la lune parcourrait en une minute, si la force d'impulsion qui la porte de A en D venait à s'évanouir. Or, on peut aisément calculer la longueur de ce sinus verse. En effet, suivant les lois que nous avons établies, le chemin parcouru en vertu de la force centripète, dans un temps donné, est égal au carré du chemin parcouru suivant la courbe dans le même temps, divisé par le diamètre de l'orbite. Or, l'arc décrit par la lune en une minute est de 60,059^{m},270, dont le carré est 3,607,115,912^{m}, 933, qui, étant divisés par le diamètre de l'orbite, qui est 751,876,771^{m},828, donnent

pour quotient $4^m,797$, c'est-à-dire 14 pieds 9 pouces 3 lignes. Mais comme nous avons établi que les forces sont proportionnelles aux vitesses qu'elles impriment, il est évident que si la force d'attraction est 3600 à la surface de la terre, c'est-à-dire à l'extrémité d'un de ses rayons, elle devient 1 à la distance où se trouve la lune, qui est de 60 rayons de la terre, et que par conséquent elle s'exerce en raison inverse du carré de la distance.

Si maintenant l'on essaie d'appliquer aux autres corps célestes la supposition d'une attraction réciproque du même ordre, on trouve que tous les phénomènes s'accordent exactement avec cette supposition. En effet, le système planétaire présente un certain nombre de dispositions générales et absolues exprimées par les lois qui portent le nom *de Kepler*, et qui sont confirmées par toutes les observations astronomiques. Ces dispositions générales sont les suivantes : 1°. *Les planètes se meuvent dans des courbes planes, et les rayons vecteurs de ces courbes décrivent des aires ou des surfaces qui sont proportionnelles aux temps.* 2°. *Les orbes des planètes sont des ellipses dont le foyer est occupé par le soleil.* 3°. *Les carrés des temps des révolutions des planètes sont entre eux comme les cubes de s diamètres.*

Ces trois propositions sont directement déduites des observations astronomiques. Et, si l'on se rappelle ce que nous avons dit (58), on verra que ce sont précisément ces circonstances qui arrivent dans le cas d'un corps sollicité à la fois par une force d'impulsion tangentielle et par une force centripète, la force centripète agissant en raison inverse du carré des distances.

D'après cette exacte coïncidence, on conclut de la première loi de Kepler que la force qui agit sur les planètes est toujours dirigée vers le centre du soleil. On conclut de la seconde loi que la force qui agit sur les planètes

s'exerce en raison inverse du carré des distances. Enfin, on voit par la troisième que l'influence du soleil est uniquement modifiée par la distance, et nullement par la différence des planètes; en sorte que si elles étaient toutes à la même distance du soleil, elles parcourraient leurs orbes dans le même temps. D'où l'on tire cette importante conclusion, que *la puissance de l'attraction est rigoureusement la même dans l'univers pour toutes les molécules de la matière.*

On démontre, comme nous l'avons dit, par le calcul, que les courbes décrites autour d'un centre d'attraction peuvent être non seulement des ellipses, mais encore toute autre section conique, c'est-à-dire des paraboles, des hyperboles, des cercles. Il est probable que la plupart des comètes décrivent des ellipses très-alongées, ou des paraboles. On n'en a pas encore observé qui décrivent des hyperboles; mais comme ces directions sont de nature à ne les placer que pendant une petite portion de leur course dans des points du ciel assez voisins de nous pour qu'on puisse les apercevoir, il est possible qu'il existe de semblables corps dont la période de voisinage se soit écoulée avant le temps où l'on a commencé à faire des observations, ou qui soient maintenant en chemin pour s'approcher de la terre de manière à devenir visibles à l'avenir.

Il n'est pas douteux que les attractions réciproques de tous les corps planétaires ne s'étendent indéfiniment autour d'eux; ce qui, dans leurs mouvemens variés, doit produire quelques perturbations, que l'on observe en effet dans la marche régulière de ces astres.

Nous verrons, par la suite, des preuves positives que l'attraction s'exerce en raison directe des masses, c'est-à-dire du nombre des molécules exerçant une attraction.

Tout concourt à confirmer ce fait dans le système planétaire. En effet, le soleil, autour duquel circulent toutes les planètes, présente une masse immense, relativement à chacune d'elles; car son diamètre est 112 fois celui de la terre; et, s'il était à la place qu'occupe cette planète, sa propre circonférence s'étendrait à près du double de la distance de la lune à la terre. Ainsi, la masse de cet astre, en supposant la densité la même, serait 1,404,928 fois la masse de la terre. D'un autre côté, les planètes ont le même genre de supériorité par rapport à leurs satellites.

Malgré la grande prépondérance de masse que présente le soleil, il est évident que s'il attire les planètes il en est attiré, en sorte qu'il doit éprouver de légers déplacemens résultant des diverses situations des planètes autour de lui, ce qui est conforme à l'observation.

DE LA PESANTEUR OU DE L'ATTRACTION TERRESTRE.

62. On donne le nom de pesanteur à la force qui détermine tous les corps éloignés de la surface du globe terrestre à s'en rapprocher. Il faut distinguer avec soin ce que l'on nomme *pesanteur* de ce que l'on nomme *poids*. La pesanteur est la force même qui sollicite les particules matérielles; elle s'estime par la vitesse qu'elle peut leur imprimer. Le poids, c'est la somme totale des forces de pesanteur sollicitant les particules matérielles qui composent un corps, et agissant contre un obstacle ou une résistance.

La force qu'on nomme *pesanteur* ne saurait être attribuée qu'au principe général d'attraction qui sollicite toutes les particules matérielles. Il y a seulement ici des circonstances particulières qu'il est important de se représenter exactement.

1°. L'un des deux corps exerçant l'attraction est la terre; son diamètre est de 2864 lieues communes, par conséquent sa masse est très-considérable.

2°. Les corps sur lesquels nous sommes à même d'observer les effets de la pesanteur ont une masse extrêmement petite relativement à celle de la terre.

3°. Ces corps sont placés à une très grande distance du centre de la terre.

Il résulte de ces circonstances que, malgré la réciprocité d'attraction, les petits corps semblent se mouvoir seuls, les mouvemens réels que la terre peut éprouver étant absolument insensibles; il résulte encore que la force d'attraction exercée par la terre est extrêmement considérable.

Nous avons à considérer, pour étudier la pesanteur avec méthode: 1° sa direction, 2° son intensité, 3° sa composition avec d'autres puissances.

63. *Direction de la pesanteur.* — Tous les corps que l'on éloigne accidentellement de la surface du globe s'en rapprochent par une ligne droite normale à la surface de la terre, c'est-à-dire perpendiculaire à la surface sphérique de cette terre, en faisant abstraction des inégalités qu'elle peut présenter. On a donné à cette ligne le nom de *ligne verticale*; et comme la terre présente à peu près la figure d'une sphère, il en résulte que toutes les lignes par lesquelles les corps tombent sur les différens points de la surface du globe tendent vers son centre ou se trouvent dans le prolongement d'un des rayons de la sphère. Cependant, comme le rayon de la terre est de 1,432 lieues, il en résulte que deux lignes verticales voisines l'une de l'autre sont sensiblement parallèles. On obtient aisément, et d'une manière permanente, la direction verticale dont nous parlons en suspendant un corps pesant à l'extrémité d'un fil, car le fil se trouve tendu précisément dans la direction où la pe-

santeur sollicite le corps. Cet instrument porte le nom de *fil-à-plomb.*

Pour se rendre compte de cette tendance de tous les corps vers le point central de la masse du globe, il est nécessaire de se rappeler le principe suivant : *Si toutes les particules d'une sphère exercent une attraction égale sur un même point matériel situé au-dehors ou au-dedans de cette sphère, la résultante commune de toutes ces puissances passera par le centre de la sphère.* On conçoit aisément la vérité de cette proposition, en se représentant qu'en vertu de la symétrie du solide sphérique quelque point que l'on veuille prendre pour exemple, d'un côté de la sphère, il se trouvera toujours nécessairement, du côté opposé, un autre point situé rigoureusement de la même manière; qu'en conséquence la résultante des forces exercées par ces deux points passera par le centre, et qu'on peut en dire autant de tous les points matériels qui composent la sphère. Il résulte de cette considération que, quoique la pesanteur soit effectivement le résultat d'une quantité innombrable de forces agissant à la fois sur un même corps, on peut toujours la considérer comme une force unique dont la direction passerait par le centre de la terre.

Tout ce que nous venons de dire serait rigoureusement vrai si la terre était exactement sphérique; mais il en est autrement. La terre a réellement la forme d'un sphéroïde aplati vers les pôles, en sorte que le diamètre de l'équateur excède la longueur de son axe d'environ 13 lieues et demie. Huyghens et Newton établirent cette disposition, en considérant que la matière du globe terrestre tournant avec rapidité sur son axe, devait éprouver une impulsion centrifuge très considérable à l'équateur, et tout à fait nulle aux deux pôles. Newton détermina même l'aplatissement par une formule que tout confirme aujourd'hui. Le fait a

été démontré par des mesures exactes des arcs du méridien, dont les degrés se sont trouvés plus courts vers l'équateur, plus longs vers les pôles. Il résulte de cette disposition que le centre de la terre, vers lequel tendent les verticales, n'est pas un point unique, mais qu'il varie de quelque chose suivant le lieu de la terre où se fait l'expérience. Cette différence est du reste si petite, qu'elle peut être négligée dans la plupart des cas.

Les grandes inégalités que présente la surface du globe peuvent aussi déranger d'une manière notable la direction de la verticale ou de la pesanteur; elle ne doit même se trouver parfaitement rigoureuse qu'en pleine mer, et l'on a observé qu'au voisinage d'une grande montagne le fil-à-plomb était sensiblement devié du côté de la montagne, par l'effet de cette grande masse matérielle qui sort de la symétrie sphérique générale du globe.

64. *Intensité de la Pesanteur.* — Nous avons établi que la pesanteur était une force agissant également sur toutes les particules de la matière; il en résulte que la véritable mesure de l'intensité de cette force, dans un corps quelconque, est précisément la vitesse avec laquelle ce corps se meut quand il est sollicité par la pesanteur; car, quel que soit le nombre des molécules réunies, chacune d'elles a sa force propre qui n'augmente ou ne diminue en rien la force qui agit sur les autres, en sorte qu'elles peuvent se mouvoir ensemble ou séparément avec la même vitesse.

Nous avons vu aussi que la force d'attraction agissait constamment sur les particules de la matière, qu'elles soient en repos ou en mouvement; il en résulte que la pesanteur agit encore sur des particules qui ont déjà contracté une vitesse quelconque en vertu de cette même pesanteur. Cette force est donc du nombre de celles que nous avons appelées accélératrices; et, pour juger de son intensité, il faut

considérer la vitesse qu'elle produit dans des temps déterminés, cette vitesse devenant plus grande à mesure que ces temps s'ajoutent les uns aux autres.

Si l'on prend à Paris un corps solide présentant une grande masse sous un petit volume, comme une balle de plomb, par exemple, et qu'on laisse tomber cette balle pendant une seconde de temps, elle parcourra 4,871 millimètres, ou environ 15 pieds, dans cette première seconde de chute; on peut donc dire que la force de la pesanteur est capable de faire parcourir à un corps 15 pieds dans une seconde.

Il résulterait des principes que nous avons établis que tous les corps devraient tomber avec cette même vitesse, quelle que fût leur nature; cependant tout le monde sait qu'il en est autrement, et que les corps qu'on appelle *légers*, comme une plume, le duvet, tombent beaucoup plus lentement que d'autres corps qu'on appelle *lourds*, par opposition. Il existe même des corps qui ne tombent pas du tout, et qui au contraire semblent doués d'une force qui les éloigne du centre de la terre : tel est le gaz hydrogène dont on remplit les aérostats. Ces anomalies apparentes dépendent de l'existence de l'air, au milieu duquel se font ordinairement nos expériences. En effet, nous verrons que les fluides élastiques opposent au mouvement des corps une résistance qui croît comme le carré des vitesses, et qui devient d'autant plus sensible que le volume du corps qui tombe est plus considérable relativement à sa masse; tandis que d'une autre part cet air qui nous environne ayant un poids déterminé, les corps moins pesans que lui s'élèvent au milieu de sa masse, comme un morceau de liége qui s'échapperait du fond d'un vase plein d'eau.

En faisant des expériences sur la chute des corps d'une assez grande hauteur, Désagulliers a remarqué que

deux boules du même diamètre, dont l'une pesait 19 fois plus que l'autre, tombaient d'une hauteur donnée, la plus légère dans un temps comme 19 secondes, la plus lourde dans un temps comme 6 et demi; ce qui prouve déjà que la rapidité de la chute n'est pas dans la proportion de la différence des masses, car l'une des boules aurait dû tomber 19 fois plus vite que l'autre. Il a trouvé, au contraire, que le retardement dans la chute était proportionnel au volume du corps comparé à sa masse. Il devenait déjà très probable que ce retardement n'était dû qu'à la résistance de l'air; mais ce fait est complètement démontré par l'expérience suivante. Si l'on prend un tube de cristal de deux mètres de long et de deux pouces de diamètre environ, fermé par une de ses extrémités et garni d'un robinet par l'autre, et que l'on enferme dans ce tube une petite rondelle de plomb et une de papier, en renversant subitement le tube, on observera que les deux rondelles tomberont dans son intérieur, la masse de plomb très vite et le morceau de papier très lentement, en sorte que l'une arrivera au bas du tube bien avant l'autre. Mais si l'on fait le vide dans le tube à l'aide de la machine pneumatique, et qu'on répète l'expérience, on verra que les deux corps tomberont alors exactement avec la même vitesse, et frapperont ensemble l'extrémité inférieure du tube. Ainsi les corps tombant tous avec une égale vitesse dans le vide, les anomalies dont nous avons parlé ne tiennent qu'à la résistance de l'air.

On démontre la même chose au moyen d'une autre expérience plus simple, et peut-être plus ingénieuse. Si l'on prend un parallélipipède en plomb, et une feuille de papier capable de couvrir exactement une de ses faces, et qu'on laisse tomber séparément l'un et l'autre corps dans l'air, la masse de plomb arrivera à terre beaucoup plus

vite que la feuille de papier ; mais si l'on place cette feuille de papier sur la face supérieure de la masse de plomb, les deux corps tomberont alors ensemble, parce que la masse de plomb marchant la première empêchera la résistance de l'air d'agir sur la feuille de papier.

La pesanteur ne paraît avoir subi aucune altération depuis l'époque où on a pu faire des observations, et il est très probable qu'elle est invariable.

65. La force de la pesanteur doit, suivant les lois que nous avons établies, varier d'intensité à mesure que l'on s'éloigne de la surface de la terre ou que l'on s'enfonce dans ses profondeurs. Cependant les expériences faites sur les plus grandes élévations ou dans les mines les plus profondes n'ont présenté aucune différence sensible dans la vitesse de la chute des corps, qui est la mesure de cette pesanteur. On concevra facilement cette égalité apparente, en considérant que l'attraction agit comme si elle était produite par une force unique placée au centre de la terre ; que la distance de ce centre à la surface où nous faisons les expériences est de 1432 lieues ; que la plus grande élévation au dessus de la surface du globe où nous puissions répéter des expériences n'excède guère une lieue, en sorte que la différence de vitesse doit être égale à la différence du carré de 1432 au carré de 1433 qui est de 0,0013, c'est-à-dire une quantité beaucoup trop petite pour être appréciée dans les expériences. Il est résulté de cette égalité apparente que l'on a dû croire la pesanteur invariable, jusqu'à ce que Newton eût démontré la loi de sa diminution par les distances, à l'aide des observations lunaires.

Nous verrons, par la suite, que les oscillations d'un pendule sont déterminées par la pesanteur et obéissent à ses lois. Ce mode d'appréciation de l'intensité de la pesanteur est infiniment plus délicat que la chute directe des

corps : aussi Bouguer et La Condamine ayant fait osciller un pendule, pendant la durée de la révolution d'une étoile fixe, au sommet et au pied des Cordilières, ont trouvé entre le nombre de ses oscillations une différence qui s'accorde avec la loi de Newton.

La force de la pesanteur varie dans les différens points de la surface du globe; elle est plus grande au pôle, et plus faible vers l'équateur. Cette variation dépend de plusieurs causes.

La terre faisant sa révolution sur son axe en vingt-quatre heures, il en résulte que chaque point de sa surface est doué d'une force centrifuge plus ou moins grande, qui a son *maximum* à l'équateur, et qui est nulle au pôle. A l'équateur, par exemple, la vitesse de rotation est de 463 mètres par seconde; cette vitesse produit une force centrifuge capable de faire parcourir au corps, pendant une seconde, $0^{m},017$. Or, cette force, agissant dans la direction du rayon, est directement opposée à la force de la pesanteur; et comme la force de la pesanteur fait parcourir à un corps, dans le même lieu, $4^{m},89$ en une seconde, il en résulte que, si la force centrifuge n'existait pas, la pesanteur ferait parcourir au corps, dans une seconde, $4^{m},89+0^{m},017$, ou $4^{m},907$.

La force centrifuge va en diminuant de l'équateur au pôle, en raison de la diminution des rayons des cercles décrits autour de l'axe, et par conséquent celle de la pesanteur s'accroît d'autant, à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur.

Mais une autre raison vient encore concourir à diminuer l'effet de la force centrifuge relativement à la pesanteur; car à l'équateur les deux forces sont directement opposées l'une à l'autre. Mais dans une latitude quelconque, la direction de la pesanteur est toujours suivant le rayon

de la terre, tandis que la direction de la force centrifuge est perpendiculaire à l'axe de rotation; et ces deux lignes formant un angle, une partie seulement de la force centrifuge de ce point est employée à combattre la pesanteur.

En tenant compte de toutes ces dispositions, on trouve encore que la force de la pesanteur s'accroît vers les pôles dans une proportion plus grande que ne le comporteraient la diminution de la force centrifuge et l'obliquité de sa direction par rapport à celle de la pesanteur; ce que l'on doit attribuer à la différence des diamètres de la terre, qui est telle, que vers les pôles les corps sont environ sept lieues plus près du centre de la terre qu'à l'équateur.

Toutes les expériences qui servent de base aux propositions que nous venons d'établir, ont été faites avec le pendule, qui présente, comme nous l'avons dit, un moyen très délicat et très exact de mesurer les différences d'intensité de la pesanteur.

En considérant les dispositions actuelles du globe, on trouve que si sa vitesse de rotation était dix-sept fois plus grande qu'elle n'est, les corps n'auraient aucune pesanteur à l'équateur, et que si elle devenait encore plus considérable, toutes les parties qui composent le globe pourraient se désunir et être projetées dans l'espace.

On trouve encore, dans la considération de cette force centrifuge, une ingénieuse théorie proposée par de Laplace pour expliquer la formation des planètes et de leurs satellites.

Supposant que la terre a été très chaude, et même dans un état de fusion ignée, elle devait être entourée d'une immense atmosphère qui s'étendait beaucoup plus loin que la distance où est aujourd'hui la lune; mais il est évident que cette atmosphère tournant avec la terre, devait, à une certaine distance de celle-ci, posséder une force

centrifuge égale à l'attraction du globe terrestre, et par conséquent cesser d'en être attirée : admettant ensuite que l'atmosphère se soit condensée progressivement par le froid, tout ce qui était entre cette zone d'équilibre et la terre s'est rapproché de celle-ci, et il ne reste plus que notre atmosphère actuelle qui a 12 ou 14 lieues d'épaisseur, et par delà l'espace est vide; mais toute la matière qui se trouvait au delà du point d'équilibre n'ayant obéi qu'à l'attraction réciproque de ses particules, s'est condensée en un seul globe, qu'on nomme la lune, et qui continue de circuler autour de nous. On peut en dire autant de toutes les planètes par rapport au soleil, et de tous les satellites par rapport à leurs planètes.

Ce qui paraît confirmer cette supposition, c'est que toutes les planètes tournent dans le même sens, et presque dans le même plan, autour du soleil; malheureusement pour cette brillante théorie, les petites planètes nouvellement découvertes sont dans des plans tout différens, et les comètes marchent même en sens contraire les unes des autres.

Un autre fait récemment constaté en Allemagne présente une preuve élégante et curieuse de l'influence du mouvement de rotation : on a trouvé que les corps qui tombent de très haut ne suivent pas exactement la ligne verticale, mais arrivent sur le sol au delà du point où ils devraient tomber, du côté de l'est, c'est-à dire dans le sens où la terre tourne. On conçoit en effet qu'au moment du départ le corps tourne plus vite que le point sur lequel il doit tomber, et qu'en conséquence, ayant un peu plus de vitesse que celui-ci, il doit le devancer de quelque chose.

66. *Lois de la chute des corps.* — Nous avons établi (51) qu'une force agissant incessamment sur une particule matérielle, lui faisait parcourir des espaces qui étaient entre

eux comme les carrés des temps, et que les vitesses acquises étaient capables de faire parcourir au point matériel, dans le même temps, des espaces doubles de ceux précédemment parcourus; ce que nous avons nommé mouvement uniformément accéléré.

La pesanteur agissant incessamment sur les particules de la matière, il en résulte que la chute des corps doit être en effet un mouvement uniformément accéléré, soumis aux lois indiquées. Cet exemple nous servira en même temps à démontrer la *loi de la chute des corps*, et à confirmer, par des expériences directes, les lois abstraites que nous avons établies pour ce genre de mouvement.

Si l'on se place au sommet d'une tour, et que de là on laisse tomber des corps pesans pendant des temps que l'on puisse mesurer avec exactitude, aussi bien que les espaces parcourus par les corps, on trouve que dans la première seconde de chute un corps tombe d'à peu près $4^m,9$, ou 15 pieds; que pendant deux secondes il tombe de $19^m,6$; que pendant trois secondes le corps tombe à peu près de $44^m,1$, etc.; en sorte que l'on trouve que l'espace parcouru étant $4^m,9$ dans une seconde, est quatre fois cette longueur dans deux secondes, neuf fois cette longueur dans trois secondes, etc. *Les espaces parcourus sont donc comme les carrés des temps.* Si maintenant l'on veut savoir quels sont les espaces parcourus pendant chacun des temps successifs, il suffira de retrancher de l'espace parcouru en deux secondes l'espace parcouru dans la première; de l'espace parcouru en trois secondes l'espace parcouru dans les deux premières, etc., et l'on trouvera que les corps parcourent $4^m,9$ dans la première seconde, trois fois $4^m,9$ ou $14^m,7$ dans la deuxième seconde, cinq fois $4^m,9$ ou $24^m,5$, dans la troisième seconde, etc; c'est-à-dire que les

espaces parcourus dans les temps successifs sont comme la série des nombres impairs, 1, 3, 5, 7, etc.

Les expériences que nous venons de citer, et qui ont été répétées un grand nombre de fois, sont toujours affectées d'une irrégularité plus ou moins considérable, dépendant de la résistance de l'air, qui s'accroît rapidement avec la vitesse des corps ou la hauteur de laquelle on les laisse tomber. Ces expériences présentent, du reste, une assez grande difficulté d'exécution, et l'on ne saurait constater par cette méthode la proportion de la vitesse acquise au bout d'un temps donné.

67. Une machine imaginée par Atwood a fourni le moyen de ralentir considérablement la chute des corps, en conservant exactement la loi de cette chute, ou le mouvement uniformément accéléré. Cette machine consiste en une poulie très légère et très mobile, dont les axes, pour diminuer le frottement, reposent sur d'autres poulies très mobiles elles-mêmes. Cet appareil est placé au sommet d'une colonne dont la hauteur est divisée en intervalles égaux pouvant servir à mesurer l'étendue de la chute. Sur la poulie passe un fil de soie très délié, aux extrémités duquel sont attachés deux poids qui se font équilibre. Le long de la hauteur de la colonne se trouve une planchette en cuivre, qui s'élève ou s'abaisse à volonté, pour recevoir le corps à sa chute, ainsi qu'un anneau disposé de la même manière, et dans lequel les poids suspendus au fil peuvent passer librement.

La machine étant construite de cette manière, il est évident que les deux corps qui sont attachés aux extrémités du fil, ayant des poids égaux qui se contrebalancent réciproquement, sont exactement dans le même cas que s'ils n'étaient nullement sollicités par la pesanteur. En effet ils demeurent dans toutes les positions où on les place, et si

on leur imprime un mouvement quelconque, ils se meuvent uniformément, l'un en montant et l'autre en descendant, parcourant ainsi des espaces égaux dans des temps égaux.

Il est encore évident que si ces deux corps composant une masse que nous appelons 900 étaient abandonnés à eux-mêmes, ils tomberaient vers la terre suivant les lois de la pesanteur, en parcourant $4^{m},9$ dans la première seconde. Il en serait exactement de même d'une petite masse égale à 100, qui serait abandonnée à sa chute naturelle. Mais si l'on place cette petite masse sur l'un des deux poids en équilibre, on aura dès lors une masse égale à 1000, partageant la force de la pesanteur d'une petite masse égale à 100, et par conséquent l'intensité de la pesanteur dans la masse commune sera réduite à $\frac{1}{10}$. c'est-à-dire qu'au lieu de faire parcourir au corps $4^{m},9$ dans la première seconde, elle ne leur fera parcourir que le dixième de cet espace, ou $0^{m},49$; et pourtant, comme elle ne cesse pas d'être une force accélératrice, les rapports des espaces parcourus dans différens temps resteront les mêmes. On pourra donc obtenir ainsi à volonté toutes sortes de vitesses en employant des masses accélératrices variées; et même en donnant à ces masses une forme alongée qui excède le diamètre des poids, on pourra faire que ces masses accélératrices soient retenues au passage par l'anneau que les poids traversent, en sorte qu'il sera possible de mesurer les espaces parcourus pendant l'action de la force accélératrice, et après que cette action aura cessé.

Afin de compter avec exactitude les temps de la chute des corps, on fixe à la machine un pendule qui bat des secondes et des demi-secondes.

Pour exprimer d'une manière générale toutes les condi-

tions de la machine d'Atwood, soient m la masse réunie de l'un des corps et de la masse accélératrice, m' la masse de l'autre; soit g la force de la gravité, et soit v la vitesse au bout d'un temps t; on a $v = \frac{m - m'}{m + m'} gt$. Si l'une des masses m était librement abandonnée à elle-même, la vitesse serait gt; c'est le cas ordinaire de la pesanteur. Si la différence entre m et m' est telle que nous l'avons supposée tout-à-l'heure, $m - m'$ égalera 100, $m + m'$ égalera 1000; ainsi on aura $v = \frac{1}{10} gt$, et par conséquent l'espace parcouru sera égal à $\frac{1}{10}$ de $4^m, 9$, ou à $0^m, 49$.

On voit que dans la machine que nous venons de décrire, les divisions de l'échelle doivent être proportionnelles aux petites masses qu'on emploie pour produire le mouvement, en sorte que l'on peut avoir sur cette échelle des décimètres ou des centimètres qui représentent exactement un mètre dans la chute naturelle des corps. Cette manière d'opérer présente un grand avantage, soit par la commodité de répéter à volonté des expériences, soit parce que les vitesses ne devenant jamais considérables, les effets de la résistance de l'air sont presque nuls; mais elle offre aussi des inexactitudes, qui dépendent, 1° de ce que la masse de la poulie doit être mise en mouvement en même temps que les poids. Quant à cette première cause, elle ne dérange pas la loi d'accélération, et l'on peut même la faire entrer dans le calcul, en supposant que la moitié de la masse de la poulie est réunie à celle des deux corps en mouvement; 2° de ce que le fil, quoique très fin, a pourtant une pesanteur et une raideur quelconque; 3° enfin, de ce que le frottement, quoique diminué autant que possible, ne peut cependant être réduit à zéro. Ces deux dernières causes sont insusceptibles d'être soumises au

calcul ; mais leur influence est heureusement très peu considérable dans une machine bien faite.

En laissant tomber du haut de l'échelle un des deux poids chargé d'une masse accélératrice proportionnée à l'échelle dont on fait usage, plaçant le petit plateau dans le point convenable de l'échelle, et comptant exactement les temps de la chute, on vérifie très aisément que les corps parcourent des espaces proportionnels aux carrés des temps, et que les espaces parcourus dans des temps successifs sont entre eux comme la série des nombres impairs ; mais on peut aussi s'assurer de l'intensité des vitesses finales. En effet, si l'on place l'anneau à la division de l'échelle où le corps peut arriver en deux secondes, par exemple, on trouve qu'après avoir franchi l'anneau, et y avoir laissé sa masse accélératrice, le corps parcourra dans deux secondes, au dessous de l'anneau, le double de l'espace qu'il avait parcouru dans les deux premières secondes qu'il a employées pour arriver à cet anneau.

On peut, à l'aide de la même machine, répéter les expériences en sens inverse, et vérifier les lois du mouvement uniformément retardé ; car on peut faire que les deux poids passent chacun dans un anneau, en sorte que l'un abandonne la force accélératrice au moment où l'autre en prend une égale qui doit le retarder. En effet, au moment où la force accélératrice abandonne le système, il devrait suivre un mouvement uniforme dont on connaît la vitesse, et l'on peut en conséquence juger de l'influence de la force retardatrice sur la vitesse acquise connue.

Nous ne donnons point ici de figure représentant la machine d'Atwood et les expériences qu'on peut faire avec elle, parce que ces sortes de représentations font très difficilement concevoir des constructions aussi compliquées, et peuvent même en donner des idées fausses, tandis qu'on en prend les notions les plus justes en consi-

dérant pendant quelques instans la machine elle-même, qui se trouve dans tous les cabinets de physique, et avec laquelle nous répétons les expériences dans les cours publics.

Pour éclaircir la question des vitesses acquises et des espaces parcourus, nous présenterons le tableau suivant de la chute d'un corps.

Point de départ. —	Vitesse o.
	Espace parcouru 4m.9
Une seconde écoulée. —	Vitesse acquise 9m.8.
En vertu de la vitesse acquise. . 9,8	
	Espace parcouru 14,7
Par la pesanteur en 1". 4,9	
Deux secondes écoulées. —	Vitesse acquise 19,6.
En vertu de la vitesse acquise. . 19,6	
	Espace parcouru 24,5
Par la pesanteur en 1" 4,9	
Trois secondes écoulées. —	Vitesse acquise 29,4.
En 3 secondes.	Total des espaces. . . . 44,1

44,1 espace parcouru est neuf fois.............. $4^{m}9$
29,4 vitesse acquise est trois fois................ $9^{m}8$

Donc les espaces parcourus sont comme les carrés des temps ;

Et les vitesses acquises comme les temps.

Il résulte des lois que nous venons d'exposer un certain nombre de phénomènes que nous observons journellement, et dont l'appréciation dépend de la connaissance de ces lois. Ainsi, les corps qui tombent d'une grande hauteur, se trouvant animés d'une vitesse proportionnelle aux temps de leur chute, produisent des chocs extrêmement violens. Et comme la pluie, la grêle, tombent en effet de plus d'une lieue de hauteur, ces substances devraient acquérir des vitesses énormes et capables de leur faire briser les corps les plus résistans. Ainsi, un grain de grêle devrait arriver à la surface de la terre avec une vitesse capable de lui faire parcourir environ 300 mètres par seconde, vitesse presque égale à celle d'un boulet de 24 qui sort du canon.

Heureusement nous verrons, en parlant de la résistance des milieux, que celle de l'air s'accroissant rapidement avec la vitesse du corps qui tombe finit par la rendre uniforme et assez médiocre, du moins quand les corps ne présentent pas une masse considérable. Il en résulte que les effets de la grêle ne sont dangereux que quand les grêlons ont une grande masse.

On peut se servir des lois de la pesanteur pour mesurer approximativement la hauteur d'un édifice ou la profondeur d'un puits. Il suffit de laisser tomber un corps pesant de toute la hauteur à mesurer, et de compter le nombre de secondes que dure la chute, soit avec une montre à secondes, soit même par les battemens du pouls. En effet, soit x la hauteur cherchée, et $3''$ le temps de la chute : on aura $x = \frac{1}{2}gt^2$, c'est-à-dire la moitié de la vitesse au

bout d'une seconde, qui est $4^m,9$, multipliée par le carré du temps, qui est 9, ou $44^m,1$, qui sera la hauteur de la tour ou la profondeur du puits. Si l'on juge du moment de l'arrivée du corps au bas de la tour ou au fond du puits, par le bruit que produit sa chute, il faudra tenir compte du temps que le son met à parcourir le même espace et le déduire du temps total observé. Ces moyens ne fournissent, au reste, qu'une appréciation grossière, attendu la résistance de l'air et la difficulté de tenir compte des fractions de secondes.

Les lois de la chute des corps que nous venons d'exposer donnent lieu à une observation très remarquable, relativement à la quantité de mouvemens dont les corps sont animés après qu'ils sont tombés de diverses hauteurs. Par exemple, si un corps est tombé de quinze pieds, sa vitesse finale, c'est-à-dire la vitesse par laquelle il faudrait multiplier sa masse pour savoir avec quelle force il frappera le sol par exemple, sera de trente pieds par seconde; si le corps est tombé de soixante pieds, sa vitesse finale sera de soixante pieds par seconde; si le corps est tombé de cent trente-cinq pieds, sa vitesse finale sera de quatre-vingt-dix pieds par seconde; enfin s'il est tombé de deux cent quarante pieds, sa vitesse finale sera de cent vingt pieds par seconde. En sorte que, pour une chute seize fois plus haute, la vitesse en frappant le sol sera seulement quatre fois plus considérable, et, en termes mathématiques, les vitesses finales sont seulement comme les racines carrées des espaces parcourus, ou comme les temps écoulés.

On peut déduire de ce principe une foule de conséquences importantes dans les applications aux arts : ainsi, par exemple, il vaut beaucoup mieux pour enfoncer des pilotis augmenter le poids du mouton qui doit les frapper que la hauteur de laquelle on laisse tomber ce mouton.

On explique par les mêmes principes le peu de proportion qu'on observe si souvent entre les accidens ou les blessures qui résultent d'une chute, et la hauteur de laquelle cette chute a eu lieu : en effet, il y a seulement deux fois plus de danger à tomber d'un quatrième étage que d'un premier, et non quatre fois, comme on pourrait le croire au premier aperçu, attendu que la vitesse finale, après la chute du quatrième étage, est seulement double de la vitesse finale après la chute du premier étage.

Pour exprimer plus simplement cette proposition importante et en apparence paradoxale, on peut dire que le danger des chutes n'est pas proportionné à la hauteur d'où elles ont lieu, mais seulement au temps qu'elles ont duré.

DE LA COMPOSITION DE LA PESANTEUR AVEC D'AUTRES PUISSANCES.

68. La force de la pesanteur agissant incessamment sur toutes les particules de la matière, elle doit se trouver à tout moment combinée avec d'autres puissances. Et même, comme on peut dire que chaque particule matérielle qui entre dans la composition d'un corps jouit de sa force particulière de pesanteur, il arrive que ces différentes puissances, soit dans un même corps, soit dans des corps différens, peuvent se composer entre elles; en sorte, par exemple, que, dans un corps, la somme des puissances de pesanteur produit une résultante, qui se compose elle-même avec la résultante des forces d'un autre corps. C'est ainsi qu'il arrive aux poids que l'on suspend aux deux extrémités du fléau d'une balance.

Pour étudier avec ordre ces différentes circonstances importantes, nous nous occuperons, 1° de la pesanteur considérée dans différens corps, ou du *poids absolu* et du

poids relatif; 2° de certains mouvemens produits par la pesanteur dans des corps suspendus à un point fixe, ou du *pendule*; 3° des changemens produits dans les effets de la pesanteur par des obstacles absolus, obliques à sa direction, c'est-à-dire des *plans inclinés*; 4° enfin, de la composition de la pesanteur avec les forces de projection.

69. *Du poids des corps.* — On donne le nom de poids d'un corps à la somme des puissances en vertu desquelles ce corps tend à s'approcher du centre de la terre. Cette somme de puissances agit évidemment sur un plan solide sur lequel repose actuellement un corps quelconque; en sorte qu'on peut encore appeler poids la pression totale exercée par un corps sur un obstacle horizontal.

Il est facile de concevoir que l'intensité de la pression dont nous venons de parler dépend : 1° de l'énergie de la pesanteur qui sollicite chaque particule; 2° du nombre de particules ainsi sollicitées, et nous avons dit que ce nombre de particules était désigné par le nom de masse du corps. En conséquence, le poids d'un corps est proportionnel au nombre de particules qui le composent, ou à sa masse, lorsque la pesanteur reste constante; et la masse restant constante, le poids peut augmenter ou diminuer comme l'énergie de la pesanteur elle-même. Ainsi, un corps composé de cent particules sera deux fois plus pesant qu'un autre corps composé de cinquante particules; et le même corps, toujours composé de cent particules, deviendrait moitié moins pesant, s'il était assez éloigné de la terre pour que la force d'attraction fût diminuée de moitié. Ce même corps serait plus pesant au pôle et moins pesant à l'équateur.

Quoique le poids soit variable dans les corps en raison du nombre de leurs particules, il n'en est pas moins vrai que, si le corps le plus lourd était abandonné à sa chute

naturelle comparativement avec un moins pesant, tous deux tomberaient avec des vitesses égales, puisque le nombre des particules qui se meuvent à la fois n'influe en rien sur la vitesse que chacune d'elles peut prendre. C'est ainsi que, pour nous servir d'une comparaison vulgaire, quatre chevaux courant de front ne vont pas plus vite que l'un d'eux séparément, quoiqu'ils soient capables d'exercer une puissance quatre fois plus grande.

S'il est démontré que sous la même latitude le poids des corps est proportionnel à leur masse, il est évident que l'on peut prendre l'un pour l'autre; et c'est ce que l'on fait habituellement en mécanique, où nous n'avons d'autres moyens de mesurer les masses qu'en mesurant le poids.

Pour mesurer le poids d'un corps, il faut, comme dans toute autre circonstance de mesure, établir un objet fixe de comparaison; et l'on sait que, dans le nouveau système de poids et de mesures, la masse qui sert de point de comparaison est celle d'un centimètre cube d'eau distillée, qu'on a nommée *gramme*. Le moyen mécanique que l'on emploie pour comparer les poids inconnus avec les poids connus est un instrument qui porte le nom de *balance*, et que nous décrirons en parlant de la mécanique des corps solides. Il a pour effet de constater l'équilibre entre la somme totale des forces de pesanteur d'un corps donné et la somme totale des forces de pesanteur d'un corps connu.

Le poids d'un corps peut être estimé sans aucune considération du volume de ce corps ou de l'espace qu'il occupe; et sous ce rapport on nomme le poids des corps *poids absolu*.

70. *Du poids spécifique.* — Les particules de matière qui composent les corps ne sont pas toujours, avons-nous dit précédemment, également écartées les unes des autres,

en sorte que dans un même espace donné il peut entrer un grand nombre de particules de telle espèce de corps, tandis qu'il n'y peut exister qu'un nombre beaucoup moindre de particules d'un corps d'une autre espèce. Si nous considérons que le poids des corps est pour nous l'expression du nombre de particules qui les composent, ou de leur masse, il deviendra facile d'apprécier la masse d'un corps qui peut être contenu dans un volume donné; il suffira pour cela de peser comparativement différens corps d'un même volume. Le résultat de ces recherches est que tous les corps connus diffèrent les uns des autres sous ce rapport; en sorte, par exemple, qu'un certain volume d'or pèse environ 19 fois plus qu'un semblable volume d'eau, et que ce même volume d'eau pèse 800 fois plus que le même volume d'air.

On conçoit que tous les résultats des expériences peuvent être rapportés à une unité de volume, à un centimètre cube, par exemple, et que si l'on a pesé des volumes beaucoup plus considérables, ces volumes eux-mêmes seront exprimés par le nombre de centimètres cubes qu'ils contiendront, comme le poids le sera de son côté par le nombre de grammes qu'il représentera.

On donne le nom de *poids spécifique* à ce poids que présente chaque corps sous un volume donné; et si l'on appelle P le poids absolu d'un corps, et V son volume, on voit que le poids spécifique sera égal à $\frac{P}{V}$, c'est-à-dire au rapport du poids au volume.

Comme le poids spécifique consiste dans une suite de rapports variés entre les poids et les volumes des différens corps, il devenait nécessaire d'avoir des points de comparaison pour ces quantités nouvelles, et l'on est convenu de



prendre le poids spécifique d'un volume d'eau pour terme de comparaison des corps liquides ou solides, et le poids spécifique d'un volume d'air pour terme de comparaison des corps gazeux. Afin de simplifier l'expression, on appelle 1,0000 le poids spécifique de l'eau et de l'air qui servent de comparaison. Si, par exemple, on trouvait qu'un volume d'or pesât 19 fois le même volume d'eau, l'expression de son poids spécifique serait 19,0000; et si l'on trouvait qu'un volume d'huile pesât moitié moins qu'un semblable volume d'eau, l'expression de son poids spécifique serait 0,5000. Nous verrons, en traitant des corps solides, liquides et gazeux, quelles méthodes ont été imaginées pour déterminer les poids relatifs ou spécifiques de chacune de ces espèces de corps.

Nous devons faire remarquer ici que l'on emploie très habituellement l'expression de *pesanteur spécifique* pour désigner le poids relatif des corps : cette expression est vicieuse et susceptible d'induire en erreur, puisqu'on nomme généralement pesanteur la force même de l'attraction terrestre qui sollicite les particules de la matière, laquelle force est constante et absolument la même pour tous les corps différens, et par conséquent ne saurait avoir rien de spécifique; tandis que le poids, dépendant du nombre des particules en action, est proportionnel à ce nombre, et peut devenir spécifique quand on le compare au volume.

Il est encore essentiel de remarquer que nous employons fréquemment, en parlant des corps, les épithètes de *lourds* ou de *légers*, lesquelles sembleraient exprimer qu'un corps peut être d'une manière absolue plus ou moins pesant qu'un autre; ce qui pourtant est faux, ces différences de poids n'ayant de réalité que quand on les considère dans les volumes égaux de différens corps. Ainsi, on appelle

corps *lourds* ou *pesans* ceux qui présentent une grande masse sous un petit volume; on nomme corps *légers* ceux qui présentent une petite masse quoiqu'ils occupent un grand volume. En sorte qu'il n'y a pas de corps lourds ou légers quand on parle du poids absolu, et qu'une livre de plume est aussi lourde qu'une livre de plomb; mais que la plume devient légère comparativement au plomb, quand on examine des volumes égaux de ces corps, ou quand il est question du poids relatif.

DU PENDULE.

71. Nous avons dit que lorsqu'un corps pesant, comme une balle de plomb, par exemple, était suspendu à un fil attaché à un point fixe, ce fil prenait exactement la direction de la puissance d'attraction terrestre; en sorte que ce corps peut être considéré comme en équilibre, entre la force de la pesanteur dirigée de haut en bas et la puissance opposée de la résistance du fil dirigée de bas en haut.

Si, lorsqu'un corps est dans la situation que nous venons de décrire, on vient à l'écarter de sa direction verticale, cet écartement ne saurait avoir lieu sans que le corps décrive un arc de cercle, puisque le fil qui le suspend est attaché à un point fixe où se trouve le centre du cercle décrit. Mais si le corps a ainsi parcouru un arc d'une étendue quelconque; si, par exemple, il a été transporté de A en B (*fig.* 11), il est évident que, dès lors, les deux forces BE et CB ne sont plus directement opposées l'une à l'autre, et qu'elles ont une résultante commune dans la direction BA; l'élévation du corps sera la même que si le corps avait été porté de A en *b*. Maintenant, si dans le point B on vient à abandonner le corps à lui-même, il tendra à des-

cendre par la ligne BE; mais comme il sera encore retenu par le fil inextensible CB, il sera forcé, pour satisfaire autant que possible à la pesanteur qui le sollicite, de retourner au point A, en parcourant l'arc BA. Lorsque le corps sera ainsi parvenu au point A, il aura acquis une certaine vitesse qui lui fera continuer sa route suivant l'arc AG; mais comme en parcourant cet arc les deux forces qui le sollicitent recommencent à former un angle entre elles, la pesanteur, qui tout à l'heure était pour lui une force accélératrice, deviendra retardatrice, jusqu'à ce que, dans un certain point G, la totalité du mouvement du corps se trouve détruite et qu'il reste en repos; mais alors le mobile retombera nécessairement par un nouveau mouvement accéléré jusqu'au point A, pour remonter de l'autre côté jusqu'au premier point B. On donne le nom d'*oscillations* à ces mouvemens alternatifs d'un corps pesant suspendu à un fil. Ces oscillations seraient éternelles, si la résistance de l'air et le frottement qui s'exerce au point C ne détruisaient à chaque fois une petite quantité du mouvement du corps, en sorte que les oscillations diminuent peu à peu d'amplitude, et qu'au bout d'un certain temps le corps se trouve immobile au point A.

L'observation la plus générale que présente le genre de mouvement dont nous venons de parler, c'est que les oscillations d'un même pendule sont *isochrones*, c'est-à-dire s'opèrent dans des temps égaux quoique les arcs décrits soient inégaux, et pourvu que ces arcs ne soient pas très grands.

Il est évident que la vitesse du mobile qui forme le pendule dépend à la fois et de la puissance d'attraction qui tend à le rapprocher de la terre, et de la force centripète représentée par le fil inextensible. Or il suffit de la simple inspection de la figure pour s'apercevoir que ces deux forces

BE et BC forment un angle entre elles toutes les fois que le pendule n'est pas dans la direction verticale. Il est facile de juger aussi que cet angle sera d'autant plus aigu que la longueur du pendule sera moindre, l'espace parcouru par le corps restant le même, et qu'en conséquence l'action de la pesanteur agira avec d'autant plus d'avantage que le pendule aura moins de longueur; ce qui devra nécessairement rendre le mouvement du corps plus rapide ou le temps des oscillations plus court. Pour faciliter l'établissement des calculs, il est d'abord nécessaire de supposer que toute la masse du corps est réunie au point A, et que le fil n'a aucune masse par lui-même. C'est à ce cas idéal que l'on donne en mécanique le nom de *pendule simple*. Quant aux masses matérielles d'un certain volume qui sont suspendues à des tiges métalliques, elles forment ce qu'on appelle des *pendules composés*, et peuvent recevoir l'application des lois qui président aux mouvemens du pendule simple, en tenant compte de la disposition des particules matérielles qui les composent, et de la situation de ce qu'on appelle leur *centre d'oscillation*.

Nous bornant ici au cas supposé du pendule simple, nous ferons remarquer qu'un corps qui tombe par le diamètre d'un cercle ou par une des cordes de ce cercle répondant au bas du diamètre parcourt ces deux lignes dans le même temps, ainsi que nous le démontrerons en parlant du plan incliné. Il s'ensuit que si le pendule, dans ses oscillations, tombait de B en A par la ligne droite BA, il emploierait, pour faire cette demi-oscillation, un temps aussi long que pour tomber dans toute la hauteur du diamètre dont le rayon est CA; d'où il résulte que, dans ce cas, les demi-oscillations présenteraient une égalité parfaite avec les chutes par le diamètre du cercle que peut décrire le pendule, et que l'oscillation entière se ferait dans un temps double.

Maintenant, si nous supposons que le pendule soit raccourci, le diamètre du cercle qu'il décrit le sera dans la même proportion, et le nouveau pendule oscillera dans le double du temps qu'emploierait le corps à tomber par le nouveau diamètre. Il s'ensuit donc que la durée du temps des oscillations sera proportionnelle à la durée du temps de la chute par le diamètre. Mais la durée de la chute verticale d'un corps est proportionnelle à la racine carrée de la longueur de cette chute ou de l'espace parcouru, puisque nous avons démontré que les espaces parcourus par les corps qui tombent étaient proportionnels aux carrés des temps de leur chute. Par exemple, si un corps tombe pendant une seconde et parcourt un espace comme 1, en tombant pendant deux secondes il parcourra un espace comme 4. Ainsi l'espace 1, parcouru dans une seconde, qui est la moitié de deux secondes, n'est que le quart de l'espace 4 parcouru en deux secondes; et les oscillations du pendule étant proportionnelles aux temps des chutes, un pendule quatre fois plus court oscillera donc deux fois plus vite, et réciproquement.

Il n'est pas vrai, comme nous l'avons supposé, que le pendule se meuve suivant la corde de l'arc qu'il décrit. Mais on démontre que les corps parcourent les arcs d'un cercle plus vite que les cordes de ces arcs, dans la proportion constante de 393 à 300; en sorte qu'il reste vrai que les *oscillations des pendules se font dans des temps qui sont proportionnels aux racines carrées de leur longueur.*

Il y a à considérer dans un pendule le temps de la durée d'une oscillation que l'on désigne par t, la longueur du pendule que l'on désigne par l, et la gravité que l'on désigne par g. Il y a aussi cette circonstance que le corps se meut dans un cercle, en sorte que la durée d'une oscillation doit être affectée par le rapport qu'il y a entre la circonférence

et le diamètre. Ce rapport s'exprime ordinairement par la lettre π.

72. Les rapports qui existent entre toutes ces choses dans un pendule qui oscille sont tous exprimés par l'équation $t=\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$, ce qui veut dire que le temps d'une oscillation est en raison directe de la racine carrée de la longueur du pendule, et en raison inverse de la racine carrée de la force de la pesanteur; car π est une constante.

De cette formule primitive on en tire d'autres qui ne sont pas moins utiles.

Si l'on suppose que le temps de l'oscillation soit une seconde, on fait $t=1$ et l'on a

$$g=\pi^2\times l, \text{ ou } g=(3,14159)^2\times l;$$

d'où l'on conclut que la force de gravité est proportionnelle aux longueurs des pendules qui battent des secondes; en effet, le même pendule qui bat des secondes à Paris demande à être raccourci pour battre des secondes à l'équateur.

On a trouvé, par exemple, que le pendule à seconde a pour longueur à l'équateur au 0° latitude 0m990925

	au 20°.......	0,991528
à Paris....	au 48°50′14″..	0,993855
	au 60°.......	0,994791
	au 80°.......	0,995924

En usant toujours de la même formule, si avec un même pendule on cherche dans différens points de la terre quelle est la force de la pesanteur, on comptera les oscillations pendant un temps T très long, un jour sidéral par exemple; alors t ou le temps d'une oscillation égalera le long temps T, divisé par le nombre d'oscillations comptées que

l'on désigne par N; on aura $t=\frac{T}{N}$, ou $\frac{T}{N}=\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$: d'où l'on voit que l et T demeurant constans, N sera proportionnel à la racine carrée de g, ou g proportionnel au carré de N. Ainsi l'intensité de la pesanteur est comme le carré du nombre des oscillations d'un pendule constant. Par exemple, s'il existait un lieu de la terre où un pendule fît 60 oscillations en une minute, et que dans un autre lieu le même pendule fît 61 oscillations, la pesanteur dans le premier serait à la pesanteur dans le second comme 3600 est à 3721, ou comme 1 est à 1,033. On conçoit combien ce mode de mesure est délicat et susceptible d'indiquer de petites différences.

Les lois que nous venons d'établir sont d'un avantage inappréciable pour déterminer avec la plus grande exactitude l'intensité des forces d'attraction. Elles ont servi à reconnaître la figure de la terre, et elles servent également à mesurer toute autre force d'attraction que celle du globe; et, par exemple, les attractions électriques et magnétiques. Galilée et Huyghens ont fait la plus heureuse application du pendule à la mesure du temps, et l'on conçoit en effet que rien n'était plus propre à cette mesure que les mouvemens très sensibles et parfaitement isochrones de l'oscillation d'un pendule. Le premier de ces physiciens se servait d'un pendule isolé, dont il entretenait sans cesse le mouvement, en comptant les battemens pendant la durée de ses expériences, ce qui leur a donné un caractère d'exactitude inconnu jusqu'à lui. Le second imagina d'appliquer le pendule aux horloges pour en régulariser le mouvement, et cet usage est devenu général avec de très grands avantages.

Pour obtenir la mesure du temps au moyen du pendule, il a fallu déterminer avec précision la longueur exacte d'un

pendule, propre à faire ses oscillations dans une fraction quelconque du jour sidéral. Et comme on a adopté pour unité du temps la seconde, c'est-à-dire la 86,400^{me} partie du jour, on a reconnu qu'à Paris le pendule simple qui battrait des secondes devrait avoir exactement 0^{m},99385 ou 3 pieds 8 lignes et $\frac{6}{10}$ de ligne. On voit que le pendule qui bat des demi-secondes doit avoir pour longueur le quart de 0^{m},99385, c'est-à-dire 0^{m},24846, tandis que le pendule qui battrait de deux secondes en deux secondes devrait avoir 4 fois 0^{m},99385 ou 3^{m},97540.

Les véritables pendules ne présentent jamais toute leur masse réunie dans un point; leur longueur absolue n'est pas celle que nous venons d'indiquer. Cette longueur est même susceptible de varier par les changemens de température. Nous dirons, en parlant de l'oscillation des corps solides, les moyens qui ont été imaginés pour déterminer ces longueurs et les rendre invariables.

On nomme jour sidéral l'intervalle qui s'écoule entre le moment de l'apparition d'une étoile fixe à l'horizon d'un observateur occupant un des points du globe, et le moment précis de la seconde apparition au même point pour le même observateur situé de la même manière; c'est cet intervalle de temps qu'il s'agit de diviser en 86,400 parties, que l'on nomme secondes : or, pour s'assurer qu'un pendule bat des secondes à Paris, il faudrait compter sans erreur, et avec une attention continue, 86,400 de ses battemens dans un espace de vingt-quatre heures, ce qui paraît à peu près impossible; aussi les astronomes ont-ils adopté un moyen très ingénieux de compter avec exactitude les oscillations sans avoir besoin d'une attention continue, et voici quel est ce moyen. On se procure un second pendule un peu plus court que celui dont on veut compter les oscillations; en les faisant d'abord osciller ensemble, il est

évident que l'un marchant plus vite que l'autre ils cesseront bientôt de battre ensemble, qu'ils arriveront à se croiser dans leurs oscillations, mais que plus tard ils reviendront à leur coïncidence primitive. Si, par exemple, la vitesse d'un des pendules était d'un centième plus grande que l'autre, après un battement ils ne seraient plus ensemble, après cinquante battemens leurs oscillations se croiseraient exactement; mais après cent battemens, le pendule qui va plus vite ayant gagné juste une oscillation entière sur celui qui bat plus lentement, les deux pendules coïncideraient de nouveau, pour se livrer encore à une nouvelle série de discordances terminée par une autre coïncidence au bout de cent autres oscillations.

Or si l'on a observé avec exactitude au bout de quel nombre de battemens deux pendules quelconques coïncident, il suffira désormais d'observer et de compter les coïncidences pour en conclure le nombre des battemens.

DU PLAN INCLINÉ.

73. Étant donné un corps pesant, si ce corps repose sur un plan horizontal, il est évident que le corps sera sollicité, d'une part, par la pesanteur qui agit verticalement de haut en bas, et d'ailleurs par la résistance du plan qui agit verticalement de bas en haut. Les deux puissances étant directement opposées, le corps restera en équilibre et immobile; c'est ce qui arrive en effet à tout corps pesant qui repose sur un plan horizontal. Si, au contraire, un corps pesant est placé en contact avec un plan vertical, la direction de la pesanteur tendant à mouvoir le corps parallèlement au plan, celui-ci n'opposera aucune résistance à un pareil mouvement, et le corps tombera librement suivant les lois ordinaires de la chute des corps. Mais entre ces

deux dispositions extrêmes le plan peut affecter tous les degrés possibles d'obliquité, et dès lors la pesanteur ne sera jamais absolument détruite par la résistance du plan, quoique son effet soit en partie combattu par cette résistance. Soit, par exemple, le plan incliné AC (*fig.* 12). Si nous représentons par A*a* la force de la pesanteur qui sollicite le corps A, la résistance du plan, devant toujours être perpendiculaire à sa surface, sera dans la direction de la ligne A *b*, qui formera un angle avec la première; et si l'on construit le parallélogramme A *b* A′ *a*, on aura une diagonale AA′, qui représentera la résultante commune des deux forces, qui sera suivant la direction du plan incliné. La longueur A *b* de la ligne, qui représente la résistance du plan, est indéfinie, puisque la résistance du plan est considérée comme telle; en sorte que le parallélogramme serait impossible à construire, si la direction de la résultante AA′ n'était pas obligée, par l'existence même du plan, dont le corps pesant ne saurait quitter la surface. On voit donc que, pour connaître le chemin parcouru par un corps, sur un plan incliné, dans le temps d'une certaine chute verticale de ce corps, il suffit de mener par l'extrémité *a* de cette chute une perpendiculaire *a* A′ à la direction du plan incliné.

Si nous supposons, dans la même figure, que la ligne *aa*′ représente la chute naturelle d'un corps, dans un second temps égal à celui pendant lequel il serait tombé de A en *a*; d'après la loi de la chute des corps, cette seconde ligne sera triple de la première. Et si du point *a*′ nous menons une nouvelle perpendiculaire *a*′ A″ à la surface du plan, la longueur A′ A″ sera l'espace parcouru sur le plan incliné pendant ce second temps. Mais les triangles A*a* A′ et A*a*′ A′ sont des triangles semblables, et la propriété de ces sortes de figures est d'avoir leurs côtés homologues proportion-

nels, en sorte que l'on pourra dire que A*a* : A*a'* : : AA : AA', c'est-à-dire que les chemins parcourus sur le plan incliné sont entre eux comme les chemins parcourus dans la chute verticale, ou bien encore que la loi d'accélération du mouvement de la chute des corps sur des plans inclinés est la même que dans la chute verticale. Ainsi, pouvant représenter l'action commune de la pesanteur et de la résistance du plan par une puissance unique AA' agissant dans la direction de ce plan, on pourra dire que cette puissance, toujours plus petite que la pesanteur, agit avec une énergie constante sur le corps qui parcourt le plan incliné, devient une force accélératrice constante, et produit dans le corps un mouvement uniformément accéléré.

Si nous supposons qu'un cercle soit décrit sur la hauteur AB (*fig.* 13) d'un plan incliné, comme diamètre vertical, admettant d'abord que le plan incliné soit AA, si l'on cherche quel espace un corps parcourrait sur ce plan incliné, dans le temps qu'il mettrait à parcourir le diamètre du cercle, il faudra, par l'extrémité inférieure B du diamètre, mener une ligne BC perpendiculaire à la direction AA' du plan incliné. Mais alors le point C se trouvera précisément un des points de la circonférence du cercle; car c'est une propriété de cette figure, que deux cordes, menées des deux extrémités du diamètre au même point de la circonférence, forment un angle droit. Si l'on conçoit maintenant un autre plan incliné AA", le chemin parcouru sur ce nouveau plan sera déterminé par la nouvelle perpendiculaire BC', qui tombera sur un nouveau point de la même circonférence. Il en serait de même pour tout autre plan incliné; d'où l'on tire cette conclusion importante :

Un corps parcourt, dans le même temps, le diamètre vertical d'un cercle, ou l'une quelconque des cordes de ce cercle,

que l'on peut mener de l'extrémité supérieure de ce diamètre à la circonférence.

Mais comme, pour chaque corde menée de l'extrémité supérieure du diamètre, il y a une autre corde égale parallèle et de même inclinaison qui passe par l'extrémité inférieure de ce diamètre, nous avons eu raison de dire que les cordes des arcs décrits par un pendule sont parcourues dans le même temps que le diamètre du cercle décrit avec la longueur du pendule comme rayon.

Si nous recherchons maintenant quelle peut être la vitesse acquise d'un corps qui a parcouru un certain espace le long d'un plan incliné, nous trouverons qu'en représentant par AB (*fig.* 14) la hauteur de ce plan, et par AC sa longueur, lorsque le corps sera arrivé au point C dans sa chute sur le plan incliné, il sera réellement descendu en ligne verticale d'une quantité AB précisément égale à la hauteur du plan. Et quoiqu'il soit descendu de cette quantité dans un temps beaucoup plus long que par une chute verticale, sa vitesse acquise sera exactement la même. En effet, d'une part, le mouvement du corps qui parcourt le plan incliné est d'autant plus lent, ou la force accélératrice d'autant moindre, que la direction du plan s'approche de l'horizontale. Mais, d'une autre part, la longueur du plan incliné, pour une hauteur donnée, s'accroît précisément suivant le même rapport, en sorte que ces deux influences doivent toujours se compenser exactement. On déduit des considérations que nous venons d'établir les propositions suivantes :

74. 1° *La durée de la chute d'un corps par un plan incliné est à la durée de la chute par la verticale de ce plan comme la longueur de ce plan est à sa hauteur.*

2° *La force qui sollicite un corps suivant la longueur d'un*

plan incliné est à la force absolue de la pesanteur comme la hauteur du plan incliné est à sa longueur totale.

3° *Les pesanteurs respectives du même corps sur différens plans inclinés sont entre elles comme les sinus des angles d'inclinaison.* D'où il suit que, dans le plan horizontal, l'action de la pesanteur devient nulle, et qu'elle est à son *maximum* quand le plan est vertical.

Ces différentes propositions se démontrent par l'expérience, soit avec un plan incliné solide sur lequel repose un corps très mobile dont on équilibre la pesanteur au moyen d'un poids attaché à un fil qui passe sur une poulie, soit au moyen d'une corde tendue sur laquelle on fait marcher un curseur.

Puisqu'il est démontré que la loi d'accélération est la même le long d'un plan incliné et le long de la ligne verticale, mais que la vitesse est beaucoup moindre, il est clair que l'on peut commodément employer un plan incliné au lieu de la machine d'Atwood pour vérifier les lois de la chute des corps que nous avons précédemment établies.

COMPOSITION DE LA PESANTEUR AVEC UNE FORCE DE PROJECTION.

73. La pesanteur sollicitant sans cesse tous les corps de la nature, ils peuvent en outre être mus par une force de projection, qui, cessant bientôt son action, les abandonne à la composition du mouvement uniforme qu'elle produit avec le mouvement accéléré qui résulte de la pesanteur. Et, dans cette composition, il peut arriver trois cas différens :

1° La force de projection peut agir dans le sens même de la pesanteur, et alors le corps parcourt dans chacun

des temps de sa chute l'espace voulu par les lois de la pesanteur, plus un espace constant relatif à la force de projection dont il est animé. Par exemple, si cette force est capable de lui faire parcourir $4^m,9$ dans une seconde, il tombera dans la première seconde en vertu de la pesanteur de $4^m,9$, et en vertu de la force de projection de $4^m,9$, c'est à dire de $9^m,8$. Dans la seconde suivante il tombera en vertu de la pesanteur de trois fois $4^m,9$ ou $14^m,7$, plus $4^m,9$ en vertu de la force de projection, c'est à dire de $19^m,6$, et ainsi de suite.

2° La force de projection peut être directement opposée à la pesanteur: le corps s'écartera alors de la terre avec une vitesse uniformément retardée, et parcourra des espaces qui seront, pour chaque temps de son élévation, égaux à ceux que la force de projection lui aurait fait parcourir seul, moins ceux que la pesanteur aurait pu lui faire parcourir en sens contraire, et il arrivera conséquemment un point où tout mouvement sera détruit dans le corps, et où, commençant à retomber vers la terre, il se comportera comme tout autre corps en chute libre. *Voyez* (54) la composition de la force constante avec la force accélératrice.

3° La force de projection pourra former un angle avec la direction de la pesanteur, et alors, ainsi que nous l'avons démontré (56), le mobile devrait décrire une parabole, car les directions de la pesanteur sont, dans un petit espace, sensiblement parallèles entre elles. Mais la résistance de l'air dans lequel se fait l'expérience diminuant continuellement la vitesse du mobile, il en résulte que la seconde branche de la courbe n'est pas semblable à la première, et l'on démontre qu'elle a la propriété d'avoir une asymptote verticale. En tenant rigoureusement compte de la petite obliquité des directions de la pesanteur, on

trouve que sans la résistance de l'air la courbe serait une ellipse dont le foyer le plus voisin serait au centre de la terre. Si nous pouvions disposer d'une force de projection beaucoup plus grande que celle que nous possédons, le mobile pourrait ne plus retomber sur le globe.

Ces différentes courbes sont celles que parcourent les projectiles, telles que les bombes et les boulets lancés plus ou moins obliquement par l'explosion de la poudre. On trouvera en général que la plus grande distance à laquelle un projectile puisse être porté coïncide avec une inclinaison de 45° à l'horizon, et qu'on obtient des amplitudes égales quand on s'éloigne de cette direction d'un même nombre de degrés au delà ou en deçà, la force de projection restant la même; mais cette force de projection est tellement variable suivant la forme de l'instrument, la quantité de poudre qu'on emploie ou qui brûle réellement, et la manière dont on a fait la charge, que l'habitude et l'exercice sont des guides beaucoup plus sûrs que le calcul pour atteindre un but déterminé.

DE L'ADHÉSION.

76. Lorsque deux corps solides ou liquides présentent des surfaces plus ou moins étendues, mais très unies, si on les applique exactement l'un sur l'autre, ce qui est très facile d'un liquide à un solide, et ce qui demande un peu plus de soin pour deux corps solides, il arrive que ces deux corps *adhèrent* l'un à l'autre, c'est à dire qu'il faut employer une puissance quelquefois très considérable pour les séparer. On attribue cette adhésion à l'attraction réciproque des deux masses; mais quelques physiciens ayant prétendu que l'adhérence dépendait de ce qu'il n'y avait

pas d'air entre les deux surfaces, tandis que l'atmosphère pressait en dehors des deux corps adhérens, on a répondu par l'expérience suivante :

Si l'on fait adhérer deux plans de glace, dont l'un soit suspendu par un crochet et dont l'autre porte un poids, et que l'on place le tout sous un récipient d'une machine pneumatique, l'adhésion continuera après qu'on aura, par un mécanisme que nous indiquerons plus tard, enlevé l'air de ce récipient. Ainsi l'adhérence n'était pas due à la pression de cet air.

Il est sans doute extraordinaire que deux corps qui, à une très petite distance l'un de l'autre, ne semblaient exercer aucune attraction réciproque, s'attirent tout à coup aussi fortement quand on les met en contact. On concevra cependant facilement ces deux circonstances, en apparence contradictoires, si l'on considère, 1° que le poids absolu d'un corps, d'un kilogramme par exemple, est le résultat de la somme des attractions de toutes les particules du globe terrestre sur la somme des particules de ce corps; et que si l'on suppose un autre poids d'un kilogramme attirant le premier, sa force d'attraction sera autant de fois plus petite que la pesanteur qu'il peut y avoir de kilogrammes dans la masse totale de la terre, et que par conséquent cette puissance sera trop petite pour être appréciée par des moyens ordinaires.

2° Que la force de l'attraction s'accroissant comme le carré des rapprochemens entre les corps, cette force, si petite à une certaine distance, pourra devenir très sensible si la distance devient infiniment petite; ce qui arrive en effet dans ce que nous appelons un Contact.

77. Ces considérations établissent la possibilité du fait de l'attraction réciproque des corps considérés en petite masse; mais Cavendish l'a démontrée et même mesurée par

une expérience trop importante pour n'en pas rendre compte ici.

Ayant attaché aux deux extrémités d'une tige très légère deux petites masses égales, et ayant suspendu ce levier par son milieu, à l'aide d'un fil de métal très fin, ce qui constitue *la balance de Coulomb*, il a vu que ce levier étant dérangé de sa direction naturelle, et le fil ayant été par conséquent tordu, le levier se livrait à des oscillations isochrones que l'on pouvait compter avec beaucoup d'exactitude. Plaçant ensuite vis à vis l'une des extrémités de ce levier un corps d'une masse assez considérable et connu, il a vu que ce levier faisait, dans un temps donné, un plus grand nombre d'oscillations que dans l'absence de la masse, et même il a constaté que différentes masses produisaient des accélérations diverses, et que la même masse exerçait plus d'action de près que de loin, le tout exactement suivant les lois générales de l'attraction, que nous avons précédemment établies.

Il reste donc démontré que l'attraction s'exerce entre les petites masses comme entre les grandes, et que l'adhésion de deux surfaces doit être attribuée à cette attraction considérablement accrue par un grand rapprochement. Cependant quelques physiciens ont pensé qu'entre les petits corps l'attraction pouvait bien s'exercer en raison inverse du cube des distances, c'est-à-dire s'accroître beaucoup plus rapidement qu'entre les grands corps, se fondant sur ce que l'attraction *paraît* tout à fait nulle à une très petite distance, et qu'elle devient tout à coup très considérable au point de contact. Cette objection est plus spécieuse que réelle, car 1° l'attraction n'est point nulle à une très petite distance; 2° dans le rapprochement de deux surfaces polies il n'y a pas un véritable contact entre toutes les particules; 3° cette grande puissance de l'adhésion ne se dé-

veloppe que quand on rapproche à la fois les unes des autres un très grand nombre de particules matérielles composant toute l'étendue des surfaces polies que l'on met en contact. On sait en effet que deux billes de plomb sphériques qui se touchent par un seul point n'adhèrent nullement l'une à l'autre; ce qui devrait arriver, d'après les calculs de Newton, si l'attraction s'accroissait en raison inverse du cube des distances, puisqu'il a trouvé que dans ce cas elle était infinie au point de contact. Il arrive au contraire que les deux billes de plomb adhèrent lorsqu'elles présentent réciproquement des surfaces planes que l'on presse fortement l'une contre l'autre; car dans ce cas la somme des attractions finies de toutes les particules en contact représente une puissance appréciable.

DE LA COHÉSION.

78. On a donné le nom de cohésion à la puissance générale de l'attraction lorsqu'elle s'exerce entre les particules qui composent un même corps; et comme on peut considérer ces particules comme autant de petits corps plus ou moins rapprochés les uns des autres, il en résulte que tout ce que nous venons de dire de l'adhésion s'applique à la cohésion. Cette puissance, commune à tous les solides et à tous les liquides, et qui n'existe pas dans les fluides aériformes, présente pourtant deux genres d'effets très différens. Dans les corps solides, elle s'oppose non seulement à l'écartement réel des particules les unes des autres, mais encore à tout changement de leurs positions respectives, tandis que dans les liquides elle s'oppose bien à l'écartement des particules, mais non à leur déplacement.

On a prétendu, pour la cohésion comme pour l'adhésion, que l'attraction moléculaire s'exerçait en raison in-

verse du cube des distances ; mais de Laplace a trouvé le moyen de concilier la loi générale avec les phénomènes de cohésion, en admettant que les intervalles qui séparent en effet les particules des corps les plus solides sont extrêmement grands relativement au diamètre de ces particules.

L'attraction de cohésion est variable dans les corps de nature différente. C'est ainsi qu'elle est très faible dans le soufre, et très considérable dans le fer ; et comme les molécules élémentaires ou les atomes des corps doivent être infiniment durs, ces différences ne peuvent dépendre que de l'arrangement des particules, et surtout de leur plus ou moins grand rapprochement. On voit en effet que la cohésion peut varier considérablement entre les particules de même nature, suivant leur arrangement. C'est ainsi que le diamant présente une très grande dureté tandis que le carbone est friable, quoique les deux corps soient de même nature.

Le degré de cohésion dépend si évidemment du rapprochement des particules qu'une pression mécanique suffit quelquefois pour rendre un corps très solide. C'est ainsi que l'*éponge* de platine est convertie en une masse solide par le choc d'un balancier, ou que de l'argile pulvérulente, fortement comprimée dans un moule, produit des briques déjà suffisamment solides pour entrer dans des constructions. On voit encore que le temps seul produit une cohérence considérable entre des particules qui ne formaient d'abord qu'un amas de parties mobiles les unes sur les autres. Nous avons vu de la limaille de fer, oubliée pendant trente ans dans un vase fermé, présenter une masse assez solide pour résister au choc du marteau.

Il est pourtant essentiel de remarquer que les corps qui jouissent du poids spécifique le plus considérable, ou qui

contiennent le plus de particules dans un espace donné, ne sont pas toujours ceux qui présentent la plus grande cohésion; car le plomb, dont le poids spécifique est beaucoup plus grand que celui du fer, présente cependant beaucoup moins de cohésion que ce dernier, puisqu'il faut bien moins de force pour séparer ses particules les unes des autres. Il paraît donc que la forme des molécules primitives et l'arrangement de ces molécules influent considérablement sur la cohésion, et les effets de cet arrangement deviennent surtout bien remarquables dans les tissus organisés qui présentent une résistance à leur déchirement, qui semble tout à fait disproportionnée à leur densité et au rapprochement réel de leurs particules en général.

En supposant ainsi toutes les particules de la matière livrées à une puissance qui tend toujours à les rapprocher, les corps devraient bientôt arriver au *maximum* de dureté et de condensation. On attribue les variétés d'état dans lesquelles ils se présentent sous ce rapport à l'action répulsive des particules du calorique, et l'on croit qu'il s'établit entre ces forces opposées des équilibres desquels résultent particulièrement l'état solide ou l'état liquide. Malgré la commodité de cette explication générale, il est pourtant bon de remarquer qu'elle ne satisfait point à tous les cas, et qu'il y a des circonstances où les corps augmentent de volume, sans qu'on voie d'où peut naître la plus forte action du calorique, et réciproquement.

Nous verrons, à l'article *Cohésion dans les corps solides*, comment on peut compléter cette théorie par la supposition des axes dans les molécules.

La cohésion dans les corps solides présente un grand nombre de modifications que l'on peut considérer comme des propriétés spéciales de ces corps, et dont nous traiterons

par la suite sous les noms de *tenacité*, de *ductilite*, d'*élasticité*, etc., etc.

DE L'ATTRACTION DE COMPOSITION.

79. Lorsque des particules de nature semblable sont mises en contact, ou, si l'on veut, suffisamment rapprochées, elles s'unissent en vertu de ce que nous avons nommé attraction de cohésion; et l'intensité de la force qui les tient réunies est toujours finie ou commensurable. Il est même toujours facile de la vaincre par des moyens mécaniques; et les corps les plus solides se laissent briser et pulvériser, en sorte que leurs molécules, précédemment réunies, se trouvent écartées les unes des autres.

Lorsqu'au contraire on rapproche jusqu'à un certain point des molécules de nature différente, il arrive très souvent que ces molécules s'unissent tout à coup, de manière à ne plus pouvoir être séparées par des moyens mécaniques quelconques. Dans le premier cas, qui n'est qu'une simple agrégation, les molécules réunies n'ont pas d'autres propriétés essentielles que celles qu'elles présentaient auparavant. Dans le second cas, au contraire, qui est une *combinaison*, les molécules réunies présentent des propriétés tout à fait différentes de celles qu'elles offraient séparément.

Comme les molécules de nature diverse qui peuvent ainsi se combiner en sont plus ou moins susceptibles, et semblent pour ainsi dire se choisir et se chercher, on a d'abord donné le nom d'*affinité chimique*, et, dans certains cas, d'*affinité élective*, à cette force inconnue qui réunit des particules hétérogènes. Depuis, on lui a donné les noms d'*attraction de composition* ou d'*attraction de combinaison*.

Le caractère particulier que présente ce genre d'attrac-

tion est précisément cette intensité ou cette énergie que l'on peut regarder comme infinie relativement à toutes les puissances mécaniques qu'on peut lui opposer, et qui ne peut être vaincue que par une puissance du même ordre, c'est à dire par l'attraction de composition d'une ou de plusieurs autres substances.

Il est très difficile de se rendre compte des phénomènes d'attraction chimique avec les suppositions et les lois que nous avons établies. Cependant on peut dire que si, dans l'agrégation, les particules des corps sont, comme le pensait de Laplace, à de grandes distances les unes des autres, dans la combinaison elles se trouvent précisément en contact, ou du moins infiniment plus près, ce qui doit rendre l'attraction réciproque infinie ou du moins très puissante. Et quant aux variétés innombrables que présente l'attraction de composition entre différens corps, on peut s'en rendre compte jusqu'à un certain point par la variété des formes primitives des particules matérielles, qui peuvent être telles, que, même dans le contact de ces particules, les centres de leurs figures se trouvent plus ou moins rapprochés.

L'attraction de composition peut être aujourd'hui considérée comme un phénomène purement électrique. Nous développerons cette théorie au livre de l'électricité.

DE LA FORCE DE RÉPULSION DU CALORIQUE.

80. Puisque, malgré l'existence démontrée d'une force attractive permanente qui sollicite également toutes les particules de la matière, nous ne voyons cependant point ces particules se réunir en une masse unique et se placer aussi près que possible les unes des autres, il faut nécessairement qu'il existe quelque puissance qui s'oppose à l'at-

traction, qui la combatte avec plus ou moins de succès, et qui prévienne ce rapprochement total qui serait son résultat nécessaire.

Quant aux corps planétaires qui circulent incessamment autour du soleil, et qui depuis tant d'années ne paraissent pas s'en être rapprochés d'une quantité sensible, on explique leur circulation par la supposition d'une impulsion première qu'ils auraient reçue suivant la tangente de leurs orbites. Il en est de même pour les satellites de ces planètes.

Quant aux particules matérielles qui composent les petits corps dont nous disposons à la surface de ce globe, comme ces particules sont vis à vis les unes des autres dans un état de repos relatif, on ne saurait admettre une explication analogue; et pour concevoir les phénomènes nombreux de dilatation, d'expansion et d'élasticité que présentent ces corps, on a supposé l'existence d'un fluide généralement répandu, auquel on a donné le nom de *calorique*, en lui attribuant des propriétés capables de produire les effets que l'on observe.

On admet donc que le calorique est composé de particules infiniment petites, qui n'ont pas de poids sensible, même quand elles sont réunies en très grand nombre. On suppose que ces particules peuvent pénétrer l'intérieur de tous les corps; qu'elles ont un certain degré d'attraction pour les particules de ces corps, et enfin qu'elles sont douées d'une force de répulsion les unes par rapport aux autres, force de répulsion qui est inversement proportionnelle aux carrés des distances; en sorte qu'on se représente les particules du corps unies à un certain nombre de particules de calorique comme sollicitées au rapprochement par leur attraction propre, et à l'écartement par la répulsion des molécules du calorique.



Admettant ces suppositions, on conçoit que si dans la masse d'un corps on a introduit de nouvelles quantités de calorique, les molécules de ce fluide se trouveront plus près les unes des autres, éprouveront une répulsion plus forte, et qu'il faudra par conséquent que les particules du corps s'écartent les unes des autres jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli entre les deux puissances opposées.

On conçoit également que le calorique, s'accumulant dans un corps solide, peut produire un assez grand écartement des particules de ce corps pour qu'elles puissent désormais circuler librement les unes autour des autres; ce qui constitue le corps liquide, dans lequel il semble que les parties matérielles soient en quelque sorte enveloppées d'une sphère de calorique, sans que pourtant ces particules soient assez écartées pour avoir perdu toute attraction réciproque ou toute cohésion.

Enfin, l'on peut aisément imaginer que le calorique, s'accumulant encore en plus grande quantité dans un corps solide ou liquide, écarte tellement ces particules les unes des autres, que leur attraction réciproque devienne sensiblement nulle, et que ces particules soient dès lors livrées à la seule influence répulsive du calorique; ce qui constitue les *fluides aériformes.* On sent du reste que si l'attraction des molécules du calorique pour les molécules du corps est très forte, il pourra en résulter un *fluide aériforme permanent*, c'est à dire un gaz; tandis que, si cette attraction est faible, le calorique pouvant être aisément séparé des molécules du fluide aériforme, il en résultera une *vapeur.*

Il s'en faut de beaucoup que les suppositions que nous venons d'établir répondent d'une manière tout à fait satisfaisante à l'ensemble des phénomènes de la nature. Mais ce sont les plus probables qu'il nous soit permis d'établir dans l'état actuel des connaissances, et il nous convient de les

adopter, quand ce ne serait que pour donner un cadre à l'observation des faits et en faciliter l'étude. (Voyez le livre intitulé *Du Calorique.*)

DES FORCES ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES.

81. Indépendamment des deux puissances générales dont nous avons démontré l'existence et les lois, on observe que dans certaines circonstances les corps exercent les uns sur les autres des attractions et des répulsions qui sont évidemment indépendantes de l'attraction générale et de la répulsion du calorique; qui ne se développent que dans des cas déterminés; qui ne durent pas plus que les circonstances qui les produisent, mais dont l'intensité est souvent très considérable. Qu'un corps résineux, ou un morceau de verre, soit légèrement frictionné dans un air sec, il deviendra capable d'attirer avec force un autre corps, et même de surmonter l'action de la pesanteur. On dit que ce corps est alors dans un *état électrique*, et l'on admet l'existence de deux fluides électriques opposés qui s'attireraient l'un l'autre, et dont les molécules respectives se repousseraient réciproquement. Ces deux puissances accidentelles suivent, dans leurs effets, des lois analogues à celles de l'attraction; et si l'on ne peut y reconnaître aucune dépendance des masses, puisque l'électricité est impondérable, on a du moins constaté que ces puissances s'exerçaient en raison inverse du carré des distances.

Ce qui rend importante l'étude des forces électriques, c'est qu'il paraît que tous les corps de la nature ont des dispositions électriques particulières; en sorte qu'il serait possible que les phénomènes que nous avons attribués à l'attraction de composition fussent uniquement déterminés

par les attractions et les répulsions électriques. (Voyez le livre intitulé *De l'Electricité.*)

On trouve dans la nature certaines masses ferrugineuses qui jouissent de la propriété d'attirer le fer et qui, par le contact, peuvent lui communiquer la faculté d'agir de même sur une autre masse de fer; et si deux de ces masses, rendues très mobiles par une suspension convenable, sont rapprochées l'une de l'autre, on observe qu'elles ont des extrémités qui s'attirent ou se repoussent réciproquement. On voit même que la terre agit sur elles d'une manière analogue, puisque l'une de leurs extrémités se dirige vers un pôle et l'autre vers le pôle opposé. On donne aux corps qui jouissent de ces propriétés le nom d'*aimans naturels* ou *artificiels.* On attribuait autrefois ces attractions et ces répulsions à un fluide particulier, qu'on avait nommé *magnétique;* mais on a reconnu depuis que tous les corps qui sont actuellement le siége d'un courant électrique jouissent de propriétés analogues; et les deux causes supposées paraissent se confondre dans une seule. (Voyez *Électricité galvanique.*)

DES FORCES OU PUISSANCES ORGANIQUES.

82. Si l'on considère dans leur plus grande généralité les êtres vivans ou organisés, on reconnaît bientôt que tous sans exception se trouvent nécessairement formés de solides et de liquides, les premiers servant à contenir les seconds, et présentant des canaux plus ou moins déliés ou des cavités plus ou moins étroites. Une seconde observation non moins générale, c'est que les fluides parcourent la longueur des canaux, ou se meuvent dans les capacités qui les contiennent, tant que l'être organisé est vivant. Après sa mort, les canaux et les liquides qu'ils contien-

nent existent encore dans leur intégrité; mais les fluides ne se meuvent plus, tout mouvement intérieur est suspendu, et dorénavant cette matière, encore organisée, mais qui n'est plus vivante, se comportera comme tout le reste de la matière. Il y a donc, comme condition inséparable de la vie, des forces ou puissances qui mettent la matière en mouvement dans les corps organisés; et à cause de cela on les a nommées *Forces organiques* ou *Forces vitales.*

Si l'on se représente l'élément général de l'organisation comme un petit canal contenant un liquide, on ne pourra concevoir le mouvement du liquide dans le canal qu'en supposant que les parois de celui-ci se resserrent pour obliger le liquide à passer dans une autre partie de sa longueur. Si ce resserrement a lieu dans un seul point d'un tuyau libre dans le reste de son étendue, le liquide se portera également vers les deux extrémités opposées du canal. Mais si quelque obstacle, qu'on peut se représenter comme une valvule ou une soupape, empêche le liquide de s'échapper dans un sens, il se portera tout entier dans l'autre, et il en résultera ce qu'on appelle une *circulation.* Au lieu de cet élément simple, il pourra se rencontrer dans les êtres vivans, d'une organisation complexe, de grandes cavités susceptibles de resserrement et communiquant avec de nombreux canaux : c'est ce qu'on observe dans le cœur des animaux pourvus de ce genre d'organes.

On voit donc que, quelles que soient les dimensions des dispositions organiques qui produisent le mouvement des liquides, on ne peut l'attribuer qu'à un resserrement des parties solides; et c'est pourquoi ce mode d'action a été nommé *contraction.*

83. Il est évident que ce phénomène général de la nature organique ne dépend d'aucune des causes que nous avons étudiées jusqu'à présent ; par conséquent il doit en

avoir une dont la nature nous est aussi complètement inconnue que celle de l'*attraction ;* et c'est à cette cause que l'on a donné le nom de *contractilité*, supposant ainsi que les organes des êtres vivans sont doués de cette propriété, comme nous supposons la matière, en général, douée de la propriété attractive.

Si nous ignorons la cause des phénomènes dont nous venons de parler, il n'en est pas moins important d'étudier leur marche et de rechercher les lois qui y président ; ce qui constitue la *physiologie*, comme l'étude des autres lois naturelles constitue la *physique* ou la *chimie.* Mais la difficulté devient ici beaucoup plus grande, car la contractilité peut exister dans les organes sans que la contraction ait lieu actuellement, et il paraît indispensable qu'un excitant quelconque vienne agir sur ces organes pour mettre en jeu la propriété dont ils sont doués. On a nommé *sensibilité* cette faculté qu'ont les organes d'agir en vertu des excitations, et on en a fait une propriété des êtres vivans; on peut la considérer comme une circonstance qui produit la contraction, ou comme un simple mode de celle-ci.

La mesure de l'énergie de la force contractile ne présente pas moins de difficulté; elle semble plutôt relative à l'intensité de l'excitation qu'à toute autre condition de la puissance elle-même.

La loi la plus importante de la contractilité est l'intermittence nécessaire de son action, et c'est là, comme nous l'avons vu, la cause principale de l'état dynamique des êtres vivans en opposition avec l'état statique des corps bruts. Il résulte de ces considérations que les forces vitales échappent à l'application rigoureuse du calcul.

D'ingénieux physiologistes ont fait subir aux propriétés vitales des divisions et subdivisions fondées sur la nature de leurs effets et sur l'espèce d'excitant qui peut les mettre

en jeu : c'est ainsi que Bichat a nommé *contractilité organique*, celle que la volonté ne peut pas déterminer ; *contractilité animale*, celle qui lui est soumise; *contractilité organique insensible*, celle qui réside dans les plus petits vaisseaux, dont on ne peut pas observer les effets en détail quoiqu'on en juge par des résultats généraux; et enfin *contractilité organique sensible*, celle qui n'est pas soumise à la volonté, mais qui produit des mouvemens très appréciables.

84. Indépendamment de ces puissances qui paraissent inhérentes aux molécules matérielles vivantes, et des phénomènes de détails qu'elles produisent, les physiologistes ont remarqué que dans la multitude des mouvemens variés, sensibles ou insensibles, qui s'exécutent continuellement dans un animal vivant, il s'établissait, indépendamment de la volonté, un ordre déterminé, une coïncidence constante entre plusieurs effets produits par des organes différens situés dans différens lieux du corps, et que la supposition de l'existence de la contractilité avec toutes ses variétés ne suffisait pas pour rendre compte de cette combinaison régulière d'actions diverses, ou de cette synergie dont nous venons de parler. Ils ont en conséquence admis l'existence d'une force, ou d'une cause commune régulatrice, qu'ils ont nommée *principe vital*. C'est seulement dans ce sens qu'il faut entendre ce que Barthez a dit de cette cause commune et générale.

85. Il existe dans les êtres organisés animaux, et surtout dans les classes les plus élevées de cette grande division des êtres vivans, des organes spéciaux qui semblent doués plus que tous les autres de la propriété contractile, et destinés à produire de grands mouvemens entre les différentes parties du corps de l'animal, ou même à transmettre ces mouvemens à d'autres corps. C'est à ces organes qu'on

a donné le nom de *muscles*. Ils sont en général soumis à la volonté, et presque toujours destinés à mouvoir les différentes parties d'une charpente osseuse qui soutient ou renferme les différens organes de l'animal, et qu'on nomme *squelette*.

Les muscles sont évidemment formés de fibres longitudinales et parallèles, dont les longueurs et les dispositions varient à l'infini, mais qui toutes sont susceptibles de contraction, et se raccourcissent alors, ou tendent à se raccourcir avec une énergie qui donne une idée très sensible de la force de contraction. On conçoit que si un faisceau quelconque de semblables fibres se trouve attaché par ses deux extrémités à deux points différens, ces deux points seront rapprochés par la contraction, et parcourront des chemins différens, suivant qu'ils offriront, l'un par rapport à l'autre, une résistance plus ou moins considérable au mouvement.

Les puissances motrices qui résident dans chacune des masses musculaires sont distribuées dans l'ensemble du corps de l'animal d'une manière extrêmement variée, quoique constante pour chaque espèce, et toujours parfaitement appropriée à la nature des mouvemens que les différentes parties du corps de l'animal doivent exécuter.

L'étude de ces dispositions et de leurs effets nécessaires constitue une partie de la physiologie qu'on nomme *Mécanique des animaux*. Si cette mécanique est tout entière sous l'influence des lois vitales, quant à la cause et à l'énergie de la contraction musculaire, elle rentre pour tout le reste sous les lois physiques ordinaires, comme nous le ferons voir en traitant de la mécanique des corps solides, et indiquant quelques unes de ses applications à la mécanique animale. C'est alors aussi que nous pourrons traiter de la théorie des grands mouvemens de l'homme ou des

animaux, aussi bien que de l'application de leurs forces propres au mouvement des corps extérieurs.

Nous n'ignorons pas qu'un grand nombre de physiologistes considèrent aujourd'hui les phénomènes que produisent les organes des êtres vivans comme dépendans uniquement de l'organisation elle-même, c'est-à-dire de l'arrangement particulier des particules matérielles. Ceux qui adoptent ces principes ne sauraient concevoir le moindre changement dans l'exécution des fonctions d'un organe sans admettre une modification quelconque de la structure, en sorte que toutes les maladies, par exemple, dépendent exclusivement, dans ce système, d'une lésion matérielle de l'organe affecté.

Nous pensons que cette méthode de raisonner n'est autre chose que le renouvellement des propriétés occultes, vieilles erreurs depuis long-temps bannies de la philosophie naturelle. Nous trouvons, avec Newton, beaucoup plus utile et beaucoup plus philosophique de supposer l'existence d'un certain nombre de forces ou de principes actifs, à l'aide desquels on puisse se rendre compte de la plupart des phénomènes que présente la matière, considérée d'ailleurs comme absolument *inerte par sa nature.*

Nous pensons encore que la science de la nature ne saurait admettre deux manières de philosopher différentes pour des phénomènes de même ordre; et comme les phénomènes physiologiques se composent de mouvemens, d'attractions, de répulsions, de séparations et de combinaisons, aussi bien que les phénomènes qui se passent dans les corps bruts, il nous paraît naturel de chercher à les expliquer de la même manière.

Lorsque nous voyons un corps écarté de la surface du globe tendre à s'en rapprocher, et s'en rapprocher en effet; quand nous observons qu'un tube de verre frotté attire et

met en mouvement tous les petits corps qui l'entourent; lorsqu'une aiguille d'acier, après avoir été frottée dans une certaine direction par une autre barre du même métal, acquiert la propriété de se diriger spontanément vers les deux pôles du globe terrestre, nous n'allons pas imaginer que ces phénomènes nouveaux puissent dépendre d'un arrangement particulier de molécules matérielles ni d'aucun changement de structure, nous les expliquons au contraire par la supposition de puissances actives, telles que l'attraction, l'électricité ou le magnétisme. Nous admettons que ces puissances s'emparent en quelque sorte de la matière, la meuvent, l'agitent et la soumettent à leurs lois. Nous trouvons que plusieurs de ces puissances, admises en physique, peuvent diminuer ou augmenter d'intensité, et enfin abandonner tout à fait le corps à son inertie naturelle, et le tout sans aucun changement supposé dans la structure du corps, qui a été le siége momentané ou plutôt l'occasion de l'exercice de ces puissances temporaires.

Il nous paraît tout aussi naturel d'admettre qu'au moment où un corps organisé vient à naître, la matière qui le compose se trouve mise en jeu par des puissances nouvelles, que nous nommons organiques ou vitales; nous concevons également bien que l'intensité de ces puissances diminue ou s'accroisse, et qu'enfin elles abandonnent la matière qu'elles avaient animée, ce qui, pour des êtres organisés, s'appelle la mort.

En physique, nous tenons un grand compte de différens modes d'arrangement des particules matérielles; nous savons que cet arrangement donne lieu à une foule de modifications diverses dans les phénomènes que peuvent produire les puissances générales. Ainsi l'élasticité, dont certains corps sont doués à l'exclusion des autres, peut être attribuée à l'arrangement des particules de ces corps

quoique ses causes primitives soient évidemment les puissances de cohésion et de répulsion du calorique.

Ainsi nous considérons l'arrangement moléculaire comme une *circonstance* qui modifie le résultat des puissances d'attraction et de répulsion; de même et sur les mêmes principes, nous considérons l'organisation ou l'arrangement particulier des molécules matérielles qui composent les êtres vivans comme des *circonstances* qui modifient l'action générale des puissances que nous nommons vitales. Les conséquences de l'admission de pareils principes sont d'une grande importance en physiologie et en médecine; car si l'organisation modifie les puissances vitales, toute lésion grave de cette organisation modifiera les fonctions de l'organe : mais en outre toute augmentation ou diminution dans la puissance vitale elle-même, quoique fort indépendante de l'état matériel de l'organe, modifiera encore plus promptement ses fonctions, et dès lors il faudra reconnaître d'autres causes de troubles et d'autres maladies que des lésions organiques.

—

LIVRE SECOND.

DES CORPS SOLIDES.

CHAPITRE PREMIER.

DES PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DE LA MATIÈRE, CONSIDÉRÉES DANS LES CORPS SOLIDES.

86. Nous avons considéré jusqu'ici la matière en général, et abstraction faite des différens états qu'elle peut présenter; nous n'avons vu en elle que des points matériels isolés ou invariablement liés entre eux; nous avons étudié les lois qui président aux phénomènes les plus généraux; nous avons même passé en revue les différentes causes qui peuvent être considérées comme produisant les modifications de la matière; il est maintenant nécessaire d'appliquer ces principes généraux à l'étude des phénomènes que présentent les corps eux-mêmes, et tels que la nature nous les offre sous forme solide, liquide ou fluide élastique. Indépendamment des propriétés générales de la matière, que nous retrouverons avec des modifications spéciales dans chaque genre de corps, nous y découvrirons des manières d'être particulières qui dépendent de leur état, et nous les verrons produire des phénomènes qui ne peuvent être considérés comme appartenant indistinctement à toute espèce de matière, mais qui sont déterminés par l'arrangement

particulier que les molécules présentent dans ces différens états.

Nous commencerons ce nouveau mode d'étude par les corps solides.

ÉTENDUE ET FIGURE DES SOLIDES.

87. Nous savons que l'étendue indéfinie n'a rien d'applicable à des corps en particulier, et qu'elle n'appartient qu'à l'espace. Il n'en est pas de même de l'étendue limitée, qui présente nécessairement des *formes* ou des *figures*.

Tout corps solide a nécessairement une figure déterminée; cette figure a même une sorte de fixité ou de constance, puisque c'est la propriété caractéristique des solides que leurs particules soient entre elles dans des rapports de situation qui ne peuvent être changés sans l'emploi d'une force assez considérable. La figure des corps solides peut être irrégulière : la figure irrégulière est celle qu'on ne peut rapporter exactement à aucune forme géométrique; elle dépend, dans les corps solides, d'une multitude d'incidens impossibles à énumérer, tels que les chocs, les fractures, les roulemens des corps les uns sur les autres comme dans le lit des rivières, ou de l'accumulation subite d'un grand nombre de particules qui se réunissent sans ordre. Il paraît que toutes les causes déterminantes des formes irrégulières doivent être regardées comme perturbatrices, et que naturellement tous les corps solides tendraient, en se formant, à prendre des figures régulières.

Les formes régulières des solides portent, en général, le nom de *polyèdres* ou figures à plusieurs faces. On leur donne aussi le nom de *cristaux*, à cause de leur transparence, et par la même raison on a nommé *cristallisation*, l'opération dans laquelle on voit souvent se former des

polyèdres réguliers. Il est bon de remarquer que l'art peut donner à tous les corps solides des formes régulières absolument arbitraires et pouvant imiter les polyèdres réguliers. Il ne doit être question ici que des figures régulières produites par les seules forces de la nature.

Quand on observe un polyèdre régulier, naturel, quelle que soit sa figure, on remarque que ses arêtes sont rectilignes et très vives, que ses faces sont planes et le plus souvent parfaitement polies. On observe encore que si ce corps vient à être brisé par un choc, il en résulte un certain nombre de fragmens plus ou moins réguliers. Il est même aisé de remarquer que la fracture est beaucoup plus facile dans certaines directions que dans d'autres; mais si au lieu de briser le corps on essaie d'en enlever méthodiquement des parties quelconques, à l'aide d'un instrument tranchant par exemple, on voit que dans certain sens il est facile d'enlever une lame tout entière de la substance, et que dans d'autres directions cette espèce de dissection est tout à fait impossible : d'où l'on doit conclure qu'indépendamment de la forme régulière générale du cristal, il y a aussi un arrangement régulier de ses particules intérieures, en sorte qu'elles paraissent s'être appliquées les unes sur les autres, couches par couches, dans certaines directions particulières et suivant des lois qui doivent être constantes, puisque les mêmes substances se présentent toujours avec les mêmes formes régulières. On nomme *division mécanique* l'opération par laquelle on dissèque ainsi les cristaux; on nomme *cristallographie* la science qui s'occupe de ces formes diverses et des lois suivant lesquelles elles prennent naissance.

L'étude des lois de la cristallisation emportant la nécessité d'étudier les cristaux pendant et après leur formation toutes les fois que la chose est possible, il est nécessaire

d'indiquer les circonstances dans lesquelles ces cristaux peuvent prendre naissance.

88. On trouve dans la nature un grand nombre de cristaux tout formés, sans qu'il nous soit possible de dire exactement quelles ont été les circonstances de leur formation; mais il est aussi beaucoup de corps dont nous pouvons produire artificiellement la cristallisation. On peut dire en général que la cristallisation a lieu toutes les fois que les particules destinées à former un solide, étant d'abord écartées les unes des autres, sont ensuite parfaitement libres de se réunir lentement et suivant les lois naturelles, sans qu'aucune action mécanique étrangère vienne déranger l'influence de ces lois. On connaît trois moyens généraux de donner lieu à ces circonstances nécessaires : l'un est la dissolution; l'autre, la volatilisation; le troisième, la fusion.

Si l'on prend un corps solide, comme du sulfate de soude, et qu'on le traite par l'eau, en élevant la température, le corps solide partagera bientôt l'état liquide de l'eau; c'est ce que l'on nomme *solution*. Dans cette opération, la force de cohésion des particules du corps solide se trouve vaincue par leur attraction pour les particules du liquide, et l'on conçoit que dans cet état toutes les molécules du solide deviennent, comme celles de l'eau, capables de se mouvoir librement les unes autour des autres. Pour opérer la solution d'un solide dans l'eau, il est nécessaire d'employer une certaine quantité de ce liquide qui varie suivant les corps; il arrive même souvent qu'une même quantité d'eau dissout une beaucoup plus grande quantité du corps solide quand elle est chaude que quand elle est froide. Lorsque l'eau, froide ou chaude, contient autant du corps solide qu'elle en peut dissoudre, on dit que la solution est *saturée* à froid ou *saturée* à chaud. Dans cet état de choses, si l'on venait à soustraire tout à coup l'eau qui

tient le solide en dissolution, ou la chaleur qui augmente la solubilité, on conçoit que toutes les particules du corps dissous redeviendraient subitement solides et pourraient s'amonceler irrégulièrement; mais si le liquide est enlevé peu à peu par une évaporation lente, ou si le refroidissement a lieu successivement, et si d'ailleurs le liquide est maintenu dans un repos parfait, les particules du corps dissous reprendront l'état solide, en quelque sorte les unes après les autres; et comme dans le liquide elles peuvent se mouvoir indifféremment dans toutes les directions, elles viendront se ranger régulièrement les unes à côté des autres, suivant certaines lois que l'observation et le calcul ont fait connaître, et il en résultera des cristaux réguliers.

Si un corps solide, comme le soufre par exemple, a été pénétré d'une assez grande quantité de calorique pour que ses molécules se soient écartées jusqu'à former une vapeur, et qu'ensuite on enlève peu à peu le calorique à cette vapeur en la mettant en conctact avec des corps froids, les particules du corps solide se déposeront comme dans le cas précédent, et l'on pourra obtenir des solides réguliers. Ce mode particulier d'opérer prend le nom de *sublimation*.

Si l'on se contente de pénétrer un corps solide, comme le bismuth par exemple, d'une assez grande quantité de calorique pour le rendre liquide, et qu'on le laisse ensuite refroidir très lentement, les particules de la matière pourront encore s'arranger régulièrement dans le moment du passage de l'état liquide à l'état solide; mais comme, après le refroidissement, la totalité de la matière ne formera qu'une seule masse solide, il sera difficile d'y reconnaître la forme particulière des cristaux. Pour éviter cet inconvénient, on saisit le moment où la masse n'est encore solide qu'à son extérieur, on perce la croûte dans un

point quelconque, et l'on fait écouler par cette ouverture la partie du corps qui n'a point encore pris la forme solide.

Dans les opérations que nous venons de décrire, il est évident que l'attraction, que l'on doit nommer ici cohésion, joue le principal rôle dans la formation des cristaux, mais qu'elle ne saurait les produire à elle seule; car elle peut bien rapprocher les particules des corps, de manière à en former des masses plus ou moins compactes: mais on ne voit pas comment elle pourrait les arranger d'une manière particulière qui paraît même quelquefois contraire à sa tendance habituelle, puisqu'elle devrait fournir des sphères ou des sphéroïdes, tandis qu'il se produit souvent des aiguilles de formes très allongées, ou d'autres figures analogues.

Trois choses paraissent concourir, avec l'attraction, à la production des polyèdres réguliers qu'on nomme *cristaux:* 1° la forme géométrique *primitive* des particules de la matière; 2° une certaine tendance des molécules à se réunir en nombres déterminés; 3° l'existence de certains axes des molécules dont les extrémités exercent des actions contraires, et s'attirent ou se repoussent comme les pôles des aimans.

DES FORMES PRIMITIVES.

89. Les corps cristallisés que nous connaissons présentent des formes régulières différentes pour chaque substance, et en outre chacune de ces substances peut se présenter sous un grand nombre de formes différentes. Il semblerait donc non seulement que les molécules primitives de chaque corps eussent des formes diverses, mais même que chaque substance pût en avoir plusieurs. Le carbonate

de chaux en offrirait plusieurs centaines : mais si l'on prend un cristal de carbonate de chaux présentant, par exemple, un prisme hexaèdre régulier, et si l'on essaie d'enlever une partie de sa substance par la dissection mécanique, on trouve que des six arêtes que présente l'une de ses bases, il y en a trois dont on peut enlever une portion de substance, de manière à les tronquer et à en former de petites facettes. Si l'on fait le même essai sur l'autre base, on trouve aussi trois arêtes qui se laissent disséquer; mais ce sont précisément les arêtes opposées à celles qui, dans la première base, se sont prêtées à cette opération. Si l'on continue à enlever sur chaque facette une lame de la substance du prisme, jusqu'à ce que les six faces du prisme aient complètement disparu, il restera un rhomboïde qui formait en quelque sorte le noyau du prisme.

Quel que soit le cristal de carbonate de chaux qu'on aura examiné, il se réduira toujours à cette forme de rhomboïde, pourvu que l'on cherche et que l'on découvre le sens dans lequel il sera possible de le disséquer pour le ramener à la forme commune.

Si l'on fait subir des opérations semblables à des cristaux d'une autre substance que le carbonate de chaux, on arrivera à un résultat analogue, c'est-à-dire que dans tous les cristaux variés de cette substance on retrouvera une forme régulière qui sera la même pour tous. On donne le nom de *forme primitive* à ces cristaux qui se trouvent constamment inscrits dans tous ceux d'une même substance, et l'on nomme *formes secondaires* toutes les variétés de cristallisation que la substance peut offrir indépendamment de sa forme primitive.

Ce qu'il y a de plus remarquable dans le rapport des formes secondaires avec les formes primitives, c'est qu'il peut arriver que les unes imitent les autres. C'est ainsi que

la forme primitive de la chaux carbonatée étant un rhomboïde obtus, dont le grand angle est de 101°32′15″, l'une de ses formes secondaires est aussi un rhomboïde; mais celui-ci est aigu, l'angle de son sommet est de 601°51′20″: on peut le disséquer comme tout autre cristal secondaire, et l'on trouve dans son intérieur le véritable rhomboïde primitif, disposé de manière que ses faces sont parallèles aux arêtes du rhomboïde secondaire. Depuis les savantes recherches qui ont été poussées avec tant de zèle et d'exactitude par nos savans cristallographes, et surtout par Haüy, on n'a reconnu dans tous les cristaux que cinq formes primitives distinctes, savoir : le tétraèdre, le parallélipipède, l'octaèdre, le prisme hexaèdre et le dodécaèdre. Il faut seulement remarquer que sous le même nom plusieurs de ces figures peuvent présenter beaucoup de variétés. Le parallélipipède peut être rhomboïde, cubique, etc.; l'octaèdre peut être formé de toutes sortes de triangles, etc.

DES MOLÉCULES INTÉGRANTES.

90. La dissection des cristaux donnant pour chaque espèce un noyau d'une figure déterminée que nous avons nommée forme primitive, nous avons dû nous arrêter à cette forme, comme présentant, pour chaque substance différente, une sorte de point fixe qui peut servir à la reconnaître, et de laquelle on peut partir pour expliquer les nombreuses variétés que la nature ou l'art produisent; mais il s'en faut de beaucoup que la dissection possible d'un cristal s'arrête au moment où l'on a obtenu le noyau ou la forme primitive. Ce noyau est lui-même formé de parties qui peuvent se séparer dans certains sens déterminés; et quand on pousse l'opération jusqu'au dernier point, et même par la pensée jusqu'aux plus petites molécules du corps composé,

sans toutefois désunir ses élémens chimiques, on peut obtenir des formes semblables à celles du noyau, ou différentes, suivant les circonstances. Supposons, par exemple, que le noyau soit le rhomboïde de la chaux carbonatée : il est susceptible de division parallèlement à toutes ses faces; en enlevant donc successivement une couche de chaque face, tant qu'on pourra le faire mécaniquement, et en continuant l'opération par la pensée jusqu'à la plus petite particule, il restera toujours un rhomboïde; et comme l'opération peut se faire sur tout un cristal à la fois, ou sur tous les fragmens d'un cristal, il en résulte que toutes les particules de la chaux carbonatée présentent la forme d'un rhomboïde. C'est à ces dernières particules qu'on donne le nom de *molécules intégrantes*, les distinguant par là des molécules d'acide carbonique et de chaux, qui, dans le cas supposé, sont les *molécules constituantes* de la matière examinée. On voit que le cas où la molécule intégrante est semblable à la forme primitive ne peut arriver que pour les solides dont toutes les faces sont parallèles deux à deux, et qui ne se laissent diviser que dans le sens de ces faces.

Il est des formes primitives dans lesquelles il n'y a point de parallélisme entre les faces correspondantes, et qui ne se laissent diviser que parallèlement à ces faces : tel est, par exemple, le dodécaèdre à plans rhombes. Dans ce cas la molécule intégrante ne pourra pas avoir la même forme que le noyau, et l'on démontre qu'elle se réduit à des tétraèdres.

Il arrive quelquefois que la forme primitive est susceptible de divisions parallèles à ses faces, et en même temps d'un autre mode de division suivant une direction particulière à travers le cristal. C'est le cas de certaines formes primitives offrant le prisme droit rhomboïdal, et l'on dé-

montre alors que la molécule intégrante est un prisme triangulaire.

Enfin quelques formes primitives offrent, en apparence, pour résultat de leurs divisions, deux molécules intégrantes différentes, mais qui peuvent se réduire au tétraèdre.

Il résulte de ce que nous venons de dire, que les molécules intégrantes des cristaux se réduisent précisément aux trois formes les plus simples suivant lesquelles la matière puisse être renfermée par des plans, savoir : le tétraèdre, qui est terminé par quatre plans; le prisme triangulaire, qui est terminé par cinq plans; et le prisme quadrangulaire, qui est terminé par six plans. Ce résultat, découvert par l'expérience, et confirmé par le calcul, présente un des plus beaux exemples de la simplicité qu'offrent les lois de la nature, quand le génie de l'homme est réellement parvenu à les découvrir.

Il est essentiel de remarquer ici, comme nous l'avons fait pour les formes primitives, que les trois formes de molécules intégrantes sont susceptibles d'une variété infinie, dépendante des inclinaisons variées que leurs faces peuvent présenter les unes par rapport aux autres; que ces angles sont en général les mêmes dans les mêmes substances, et forment un caractère auquel on peut les reconnaître quand il est permis de l'observer; aussi fait-il la base de la classification minéralogique d'Haüy. Il est encore nécessaire de faire observer que le mélange d'une certaine quantité d'un corps étranger à la nature du cristal, et même les proportions variées d'un de ses élémens, n'altèrent en rien la forme exacte de sa molécule intégrante, qui constitue, ainsi du moins que le pensait Haüy, *comme un point fixe autour duquel tout le reste semble osciller.*

Malheureusement il est arrivé à la cristallographie ce qui est arrivé à plusieurs branches des sciences naturelles;

les lois qui paraissaient les plus générales ont rencontré des exceptions quand les observations se sont multipliées : c'est ainsi que M. Mitcherlich a trouvé que le soufre, la chaux et plusieurs autres corps pouvaient cristalliser sous deux formes primitives différentes ; il a de même signalé des corps qui, comme la chaux, la magnésie et le protoxide de plomb, quoique tout-à-fait différens, cristallisent sous la même forme, et il leur a donné le nom d'*isomorphe* : il a remarqué encore que les corps isomorphes pouvaient se substituer les uns aux autres dans un composé, sans changer sa forme cristalline. Quelques autres chimistes ont confirmé et étendu ces observations ; ce qui détruit la complète généralité des principes posés par Haüy.

On a encore remarqué un fait plus extraordinaire, c'est que des cristaux tout formés peuvent changer d'arrangement intérieur, et même par de légères influences : c'est ainsi que certains cristaux, après avoir été exposés à la lumière, n'offrent plus le même clivage qu'auparavant.

Ce fait remarquable vient fortement à l'appui d'une supposition que nous avons faite (87), savoir, que les molécules étaient polarisées : en effet on ne peut pas admettre que les molécules d'un cristal solide puissent changer de situations relatives, mais on peut supposer que la direction ou la polarité de leurs axes ait été modifiée par la lumière; et dès lors les plans de facile séparation seront changés, le clivage se fera autrement et la forme primitive ne sera plus la même.

DES LOIS QUI PRÉSIDENT A LA FORMATION DES CRISTAUX.

91. Après avoir indiqué les figures constantes des formes primitives et des molécules intégrantes, il restait, pour faire de la cristallographie une science, à rechercher sui-

vant quelles lois les molécules intégrantes pouvaient se réunir et s'arranger pour produire non seulement la forme primitive, mais encore toutes les variétés possibles des formes cristallines d'une substance donnée. C'est ce qu'a fait Haüy avec un succès si remarquable; nous nous contenterons de donner ici un exposé des bases de son système.

Si l'on se représente un cristal quelconque, divisible parallèlement à ses faces, on concevra que chaque lame enlevée successivement sur chacune des faces sera plus petite que la précédente; cette diminution ne saurait être attribuée qu'à la soustraction d'une ou plusieurs rangées de molécules intégrantes sur chacun des côtés de ces faces, circonstance à laquelle on a donné le nom de *décroissement:* mais on conçoit que ce décroissement peut avoir lieu à la fois sur tous les bords de la lame, sur certains bords et point sur les autres; qu'il peut être d'une seule rangée de molécules d'une lame à une autre, ou de deux ou plusieurs rangées à la fois. On observe même des décroissemens qui ont lieu dans une surface carrée, parallèlement à la diagonale, en sorte qu'il peut y avoir des décroissemens sur les bords et des décroissemens sur les angles: en admettant ces suppositions, qui paraissent très naturelles, on pourra poser ainsi le problème général de la cristallisation :

Etant donné un cristal secondaire, la figure de son noyau, la forme de ses molécules intégrantes, déterminer suivant quelles lois de décroissement, soit sur les bords, soit sur les angles des ses différentes faces, la forme composée peut se produire sur le noyau par l'addition de couches de molécules intégrantes.

Si, comme cela arrive en effet, un semblable problème peut toujours être résolu par le calcul, il en résulte que

le fait du décroissement et ses lois sont des choses démontrées.

DÉCROISSEMENT SUR LES BORDS.

92. Pour se faire une idée du décroissement, parallèlement aux bords des surfaces, on peut se représenter (*fig.* 15) un cube sur chacune des faces duquel s'appliqueraient des couches successives de nouvelles molécules; ces molécules nouvelles doivent être cubiques comme celles qui composent le gros cube lui-même. Supposons donc que sur une des faces il se dépose une couche de petits cubes, en sorte qu'il en manque une rangée seulement sur chacun des bords; que sur cette première couche il s'en dépose une seconde à laquelle il manque encore une rangée de petits cubes sur chaque bord, et ainsi de suite : il est évident qu'on arrivera à n'avoir plus, dans la dernière couche, qu'un seul petit cube, et que toutes les couches superposées formeront une pyramide quadrangulaire. Si la même chose est arrivée à chacune des faces du cube, il se trouvera transformé en un dodécaèdre à plans rhombes, qui sera une forme secondaire de la forme cubique primitive. Ce dodécaèdre sera divisible par ses angles, parallèlement aux faces du cube que l'on mettra à découvert, en en séparant six pyramides quadrangulaires qui recouvraient ces faces.

La figure qui représente ce décroissement étant grossièrement tracée pour rendre l'image sensible, présente des faces crénelées et des sommets offrant une surface apparente; mais on conçoit que s'il est question des véritables molécules intégrantes des corps, elles seront si petites, et les couches si nombreuses, que les surfaces paraîtront polies et les sommets aigus.

Le décroissement que nous venons de décrire s'est fait par une seule rangée, parallèlement à tous les bords du noyau cubique; il produit un dodécaèdre tel que les angles obtus des rhombes sont de 109°28'16", et que l'angle formé par deux rhombes entre eux est de 120°.

On conçoit que nous venons de produire un dodécaèdre, parce que les faces des pyramides se trouvent inclinées de 45° sur leurs bases, ce qui dépend de ce qu'il y a une rangée de moins pour une lame superposée; mais on conçoi que si les décroissemens avaient été plus rapides de deux rangées de molécules par lame, par exemple, les pyramides seraient surbaissées, leurs triangles correspondans ne se trouveraient plus dans le même plan, et l'on aurait un solide à vingt-quatre faces triangulaires.

Il peut arriver aussi que l'épaisseur des lames soit de deux ou plusieurs molécules, lorsque le décroissement n'est que d'une seule rangée, et alors la hauteur de la pyramide se trouvera augmentée. C'est ce qu'on a nommé *décroissement en largeur*, et *décroissement en hauteur*.

On concevra, avec la même facilité, que les décroissemens aient lieu sur deux des côtés seulement de la face du cube, ou bien sur deux de ses côtés suivant une loi, et sur les deux autres suivant une loi différente; ce qui produira déjà un très grand nombre de variétés possibles.

DÉCROISSEMENT SUR LES ANGLES.

93. Si l'on conçoit une surface carrée (*fig.* 16) *o i i' o'*, divisée en petits carrés représentant les bases des molécules intégrantes, on voit que non seulement ces molécules sont rangées en ligne suivant la direction des côtés, mais qu'elles le sont encore suivant la direction des diagonales; seulement dans ce dernier cas les molécules ne se touchent que

par leurs arêtes. On peut donc concevoir un décroissement qui consiste en ce qu'à la première couche la seule molécule *i* vienne à manquer, tandis qu'à la seconde couche les molécules *s*, *s'* manqueraient, et ainsi de suite; c'est ce qu'on nomme *décroissement par les angles* : et l'on conçoit que les faces qui pourront se produire par ce mode ne présenteront plus seulement des rainures, comme dans le cas de décroissement par les côtés, mais une multitude de saillies produites par les angles des molécules intégrantes.

Si l'on combine par la pensée les différens genres de décroissemens que nous avons indiqués, et que l'on se représente en outre que pendant ces décroissemens il peut arriver que les autres parties du cristal grossissent uniformément dans toutes les directions, on aura une idée de la manière dont peuvent se produire toutes les formes secondaires que l'on nomme *simples*.

Mais il y a une dernière circonstance qui peut donner lieu à des formes complexes très variées : en effet nous avons supposé, dans notre premier exemple, que le décroissement sur chacune des faces du cube était porté jusqu'à son terme pour produire les sommets des pyramides; mais il peut arriver que le décroissement s'arrête avant que la pyramide soit complète; alors les sommets seront remplacés par autant de faces, et la forme générale du solide sera entièrement changée.

Telles sont les bases sur lesquelles est fondée la science de la *Cristallographie*. Voyez le *Traité de Haüy*.

POROSITÉ DANS LES CORPS SOLIDES.

94. Nous avons traité (9) de la porosité d'une manière générale; nous avons vu qu'elle tenait à un écartement sen-

sible, et peut-être même très considérable, qui se trouve toujours entre les particules d'un corps. Cette propriété ne doit pas être regardée comme essentielle à la matière proprement dite, puisqu'elle dépend plutôt de l'arrangement de ses particules que de leur nature intime. Elle n'est jamais plus apparente et plus facile à prouver que dans les corps solides. Nous avons vu que la peau se laissait pénétrer par le mercure, et que l'hydrophane se laissait pénétrer par l'eau; mais il est une foule d'autres exemples qu'on peut apporter en preuve de la porosité des corps solides. Ainsi certaines pierres poreuses laissent suinter l'eau à travers leur épaisseur en arrêtant tous les corps qu'elle peut tenir en suspension. On s'en sert pour construire des fontaines filtrantes.

Les métaux eux-mêmes sont poreux d'une manière très sensible, puisque les académiciens de Florence ont vu suinter l'eau à travers les parois d'une boule d'or fortement comprimée. La fonte de fer est même tellement poreuse, qu'on n'a pas pu l'employer à la construction de certaines presses hydrauliques, et qu'il a fallu doubler le corps de pompe en cuivre, parce que l'eau comprimée passait à travers le métal.

Il est pourtant des corps solides dans lesquels la porosité ne peut être démontrée de la même manière : tel est le verre, par exemple, qui ne laisse passer ou transsuder aucun liquide ni fluide élastique; mais il reste, pour preuve de la réalité de l'existence de ses pores, la condensation qu'il éprouve lorsqu'on abaisse sa température.

95. La porosité des solides présente un phénomène général qui est connu sous le nom d'*imbibition*, et qui consiste en ce que les particules d'un liquide s'introduisent dans les pores d'un corps solide pour y rester plus ou moins fixées. Cette propriété est susceptible de modifications ré-

marquables, qui ne paraissent point tenir à la grandeur des pores du corps qui s'imbibe, ni à la petitesse des particules du fluide qui le pénètre, mais plutôt à une sorte d'affinité réciproque des deux corps. Ainsi l'or, qui ne s'imbibe d'aucun autre fluide, s'imbibe rapidement de mercure; le marbre, qui n'absorbe point l'eau, absorbe aisément l'huile; toutes les substances organiques, telles que le bois, les cordes de chanvre, les cordes à boyau, etc., s'imbibent d'eau avec une grande facilité.

Lorsque les corps solides qui se pénètrent d'un liquide ont une grande densité, ils n'augmentent point de volume par cette imbibition; mais lorsque ces corps ont une faible densité, et surtout lorsqu'ils offrent un tissu organique, ils peuvent augmenter considérablement de volume, dans certains sens ou dans tous à la fois, en absorbant un liquide.

Le bois se gonfle, transversalement à la longueur de ses fibres, d'une quantité si considérable, que toutes les douves d'un tonneau peuvent être à jour quand il est sec, et se trouver parfaitement jointes et fortement serrées lorsque le bois est humide.

D'autres substances organiques se gonflent suivant leur longueur, c'est-à-dire s'alongent; tels sont les cheveux et les cordes à boyau. Les cordes de chanvre qui sont tordues et dont les fibres sont disposées en spirales, augmentent de diamètre et se raccourcissent lorsqu'elles s'imbibent d'eau. Les tissus laminaires présentent des phénomènes opposés, lorsqu'ils sont seulement formés de fibres droites feutrées, ou lorsqu'ils sont formés de fibres tordues. Ainsi, une feuille de papier, qui est composée de petites fibres de corps ligneux qui n'ont point été tordues, s'alonge dans tous les sens quand on la mouille; c'est même le moyen qu'on emploie pour tendre le papier, en fixant ses bords

dans le moment où la feuille humide occupe plus d'étendue que dans son état naturel. Cet effet est si prononcé, qu'en mouillant un des côtés d'une feuille de papier cette face s'agrandit pendant que l'autre conserve ses dimensions, et la feuille se courbe sur elle-même. Et comme ces corps conservent toujours plus ou moins d'humidité, la même chose arrive quand on sèche un des côtés de la feuille de papier.

Quant aux tissus qui sont formés de fibres tordues, comme les toiles par exemple, ils se raccourcissent dans tous les sens lorsqu'on les mouille pour la première fois. Mais comme il y a de grands frottemens dans les torsions multipliées des fibres, ces tissus ne reviennent pas en séchant à leur étendue première, et les toiles finissent par ne plus se raccourcir lorsqu'on les mouille. On observe encore que la toile usée, qui n'a plus de torsions bien prononcées dans ses fibres, s'alonge lorsqu'on la mouille et se resserre en séchant.

Les effets dont nous venons de parler reçoivent dans les arts une foule d'applications importantes. On courbe une pièce de bois en la chauffant d'un côté pendant qu'on la mouille de l'autre. Dans l'opération du placage, qui consiste à appliquer une couche mince d'un bois précieux sur un bois plus commun, à l'aide de la colle forte, il est nécessaire de mettre de la colle sur les deux faces du placage, sans quoi ces feuilles minces se courberaient et se relèveraient par leurs bords. On peut graver en relief sur le bois par une méthode qui dépend de ces principes : on enfonce d'abord avec des poinçons toutes les parties du bois que l'on veut obtenir en saillie; on enlève ensuite avec un rabot tout le reste de la surface, jusqu'à ce qu'elle soit au niveau des enfoncemens; alors on plonge la planche dans l'eau; mais toutes les parties qui avaient été comprimées par

les poinçons, revenant à leurs volumes primitifs, forment les saillies désirées.

Nous avons dit que l'imbibition paraissait dépendre d'une sorte d'affinité ou attraction moléculaire entre les particules du corps solide et celles du corps imbibé; et l'on observe en effet que la puissance avec laquelle les liquides sont attirés et fixés dans les pores des corps solides est souvent énorme et supérieure à toute action mécanique qu'on chercherait à lui opposer. Par exemple, l'argile exerce une affinité puissante sur l'eau; elle s'en imbibe, s'en pénètre et forme une masse pâteuse, à travers laquelle il est impossible de faire pénétrer une nouvelle quantité d'eau, quelle que soit la pression qu'on emploie; ce qui prouve que la première quantité de ce liquide, qui a pénétré l'argile, s'y trouve retenue avec une très grande force. Un exemple encore plus frappant de l'imbibition résulte de la méthode employée dans quelques carrières pour diviser des meules de moulins ou des blocs de pierre quelconques. On fait, à coups de ciseau, une petite rainure dans toute la circonférence de la masse que l'on veut séparer, et l'on chasse dans cette rainure, à coups de marteau, une grande quantité de petits coins de bois séchés au feu; il suffit ensuite de mouiller ces coins de bois, pour que leur force de dilatation divise la masse de pierre dont la cohésion totale présente cependant une résistance de plusieurs milliards de kilogrammes.

L'histoire *banale* de Zapaglia prouve encore avec quelle force les cordes mouillées se raccourcissent.

L'attraction que les corps solides exercent ainsi sur les fluides qui les environnent, et les changemens de dimension qu'ils éprouvent en s'en imbibant, servent de base à l'art de l'*hygrométrie*, dont nous parlerons au chapitre de l'*Air*.

S'il est vrai, comme nous l'avons établi, que les différens corps solides exercent sur les différens liquides une attraction plus ou moins forte, ou plutôt une sorte d'affinité en vertu de laquelle ils se laissent pénétrer par l'un plutôt que par l'autre, il n'est pas moins important de remarquer que les liquides présentent entre eux la même différence et se trouvent réciproquement disposés à se mêler ou à se séparer suivant leur nature diverse. Ainsi les huiles grasses ne sont pas miscibles à l'eau, tandis que l'alcool s'y unit avec énergie. Il y a plus : certains corps, qui contiennent déjà de l'eau dans certaines proportions, ne montrent aucune tendance à s'unir avec une quantité d'eau plus considérable ; telle est l'alumine dont nous avons déjà parlé, tels sont les produits de la sécrétion des membranes muqueuses qui, sous le nom générique de *mucus*, forment des espèces d'hydrates glaireux, qui semblent des *hydrates* à proportions fixes, et qui ne se délaient point dans l'eau, même après une longue agitation.

Il est facile de concevoir que, quelle que soit d'ailleurs l'affinité d'un corps solide, pour l'eau, par exemple, il cessera de pouvoir s'en imbiber s'il est déjà pénétré de quelque autre corps non miscible à l'eau : par exemple, une feuille de papier non collé se mouillera avec la plus grande facilité, et laissera même l'eau filtrer à travers ses pores; on pourra également se servir d'une feuille de papier sec pour filtrer une huile grasse ; mais le papier imbibé d'eau n'admettra plus d'huile grasse : et réciproquement le papier huilé ne laissera plus passer l'eau. Ces phénomènes sont tellement caractérisés, que l'on peut ainsi séparer à volonté un mélange d'eau et de corps gras, en laissant filtrer soit l'eau, soit l'huile ; il suffit pour cela d'imbiber d'abord le filtre de celui des deux corps que l'on veut lui faire admettre.

Ces sortes de considérations sont d'une très grande importance dans l'appréciation des phénomènes de l'économie animale ; et pour débuter dans ces explications par un phénomène facile à constater, on peut remarquer que la peau de l'homme, quoique vivante et saine, a beaucoup d'aptitude à s'imbiber de l'eau qui peut être en contact avec sa surface externe; elle n'est défendue de cette imbibition que par une matière grasse sécrétée par les follicules sébacées, et qui enduit constamment sa surface. Si l'on plonge pendant peu de temps une partie du corps dans l'eau, on observe, en la retirant, que le fluide se rassemble en gouttelettes, et n'a contracté aucune adhérence réelle avec la peau; celle-ci ne donne en effet aucun indice d'imbibition : mais si cette partie du corps a été long-temps plongée dans l'eau chaude, ou savonneuse, ou alcaline, alors la peau est devenue inégale, son épaisseur s'est accrue, elle est devenue en quelque sorte trop grande pour le volume des parties qu'elle enveloppe, et elle se trouve froncée de toutes parts; en un mot, elle s'est imbibée d'eau comme une feuille de papier que l'on aurait mouillée. Ces phénomènes sont surtout remarquables au dedans des mains et à la plante des pieds, régions où la peau est à la fois plus épaisse et moins pourvue de sécrétion huileuse. Au reste, cet état d'imbibition disparaît promptement par l'exposition à l'air et l'évaporation du liquide absorbé.

Les peaux des animaux, conservées et préparées pour nos usages ordinaires, présentent cette disposition à s'imbiber d'eau : on ne les en défend qu'en les imprégnant profondément d'un corps gras qu'on y fait pénétrer à l'aide de la chaleur.

Voici donc que la peau morte et la peau vivante se comportent de la même manière par rapport à l'imbibition de l'eau ; qu'il ne faut pas chercher dans quelque influence

occulte de la vie le défaut d'imbibition que présente ordinairement la peau vivante, mais qu'il faut l'attribuer à l'action toute physique du corps gras sécrété par les follicules.

Si nous passons de ces faits apparens à l'investigation de phénomènes plus cachés et dont l'observation directe est plus difficile, nous pourrons remarquer qu'il est différens ordres de vaisseaux contenant dans leur intérieur des fluides particuliers dont leurs parois ne s'imbibent point, dont ils ne se laissent point traverser, et pour lesquels ils semblent complètement impénétrables; c'est ainsi que les veines, et celles du cerveau en particulier, quoique formées de parois très minces, très molles et très extensibles, renferment pourtant exactement le sang veineux, ne le laissent point transsuder au dehors, et ne s'en imbibent même en aucune façon, puisque leur tissu reste blanc quoiqu'elles contiennent un fluide très coloré. Il est infiniment probable que la membrane propre que l'on observe à l'intérieur de tous ces ordres de vaisseaux sécrète et produit elle-même un fluide spécial non miscible au fluide qui circule, et que ce fluide sécrété défend par sa présence cette membrane interne de toute imbibition.

L'existence du fluide que nous supposons est évidente à la face interne de toutes les membranes muqueuses, qui sont défendues par leur mucus même de l'imbibition des fluides auxquels elles servent de conduit ou de réservoir. Cette sécrétion particulière est généralement admise dans tous les gros troncs vasculaires; et nous sommes autorisés à en admettre l'existence en tous lieux, d'abord par induction, et ensuite parce que tous les fluides extravasés, ou qui ont quitté les cavités destinées à les contenir, s'imbibent promptement dans les nouveaux tissus qui les enferment, et qui ne présentent plus la sécrétion que nous

pourrions nommer *répulsive*, qu'offraient leurs cavités naturelles.

On conçoit avec une égale facilité que quelque temps après la mort, et lorsque les enduits des cavités internes ont cessé de se renouveler et se sont altérés ou délayés dans les fluides contenus, ceux-ci commencent à passer à travers les parois de leurs cavités, à se mêler les uns aux autres, à se porter dans les espaces vides ou vers les parties déclives, de manière à produire les lividités, les épanchemens de sérosité sanguinolente, les fausses hépatisations du poumon, les colorations des parties qui environnent la vésicule du fiel, et un grand nombre d'autres phénomènes qui sont considérés comme essentiellement cadavériques.

En résumant ces considérations, on voit que la conservation de la vie, et ses phénomènes les plus importans, reposent en grande partie sur cet état d'isolement et de séparation complète des divers fluides qui ne se trouvent et ne doivent se trouver que dans le système de cavités ou de vaisseaux qui leur est propre; que cette séparation exige impérieusement la condition de l'imperméabilité des conduits vasculaires, et que cette imperméabilité que l'on a coutume d'attribuer si vaguement à l'influence de la vie se comprend parfaitement au moyen d'une juste et régulière application de l'action physique réciproque des corps en contact.

Il serait possible d'étendre plus loin les applications du principe qui nous occupe, et d'en rechercher l'influence dans les sécrétions elles-mêmes. S'il est démontré en effet que les simples porosités d'un corps solide repoussent ou admettent un liquide donné, suivant qu'elles sont déjà pénétrées de tel ou tel autre fluide, on pourra présumer que les dernières ramifications vasculaires qui exercent l'absorption ne sauraient admettre que des liquides en rapport

convenable avec celui qui mouille déjà leur intérieur. Cette considération deviendrait bien plus importante en remarquant que la capillarité à laquelle on a depuis quelque temps fait jouer un grand rôle dans l'économie animale, élève ou attire les fluides qui peuvent mouiller les espaces capillaires, tandis qu'elle abaisse ou repousse ceux qui n'en sont pas susceptibles. (Voyez *Équilibre des Liquides dans les espaces capillaires.*)

DE LA MOBILITÉ DANS LES CORPS SOLIDES.

96. Cette propriété générale de la matière appartient aux corps solides comme à tous les autres ; mais elle présente des modifications qui dépendent de leur état. En effet, il y a quatre genres de mouvemens possibles pour un corps solide : 1° un mouvement de translation totale dans lequel les molécules ne changent pas de rapports; dans ce mouvement les molécules se suivent nécessairement les unes les autres, et forment une masse commune, en sorte que tout mouvement communiqué à l'une quelconque de ces molécules est nécessairement partagé entre toutes les autres ; 2° un mouvement de rotation autour d'un axe ; 3° un mouvement général de rapprochement ou d'écartement de ces molécules que l'on nomme dilatation ou condensation, et qui dépend du calorique ; celui-ci est très borné dans les corps solides, attendu la grande influence de l'attraction dans ces sortes de corps; 4° un mouvement particulier d'agitation des molécules que l'on connaît sous le nom de *vibration*, et qui est d'autant plus rapide dans les corps solides que leurs parties sont retenues en place par des puissances plus énergiques. La première et la seconde espèce seront examinées en traitant du mouvement des corps solides, la troisième en parlant de l'action de la

force répulsive du calorique sur leurs molécules ; et la quatrième à la fin de ce livre, comme le sujet le plus difficile de leur histoire.

DE LA DIVISIBILITÉ DANS LES CORPS SOLIDES.

97. Tout ce que nous avons dit de général sur cette propriété de la matière (16) s'applique aux corps solides, et nous les avons à cette occasion souvent cités pour exemple ; il nous reste seulement à remarquer que la division de ces corps exige une puissance proportionnée à leur cohésion. Cette division offre pourtant une circonstance remarquable, savoir : qu'un corps solide que l'on divise, tout en conservant son caractère de solidité jusque dans ses plus petites particules, le perd relativement à la masse primitive; il se change en une *poudre* ou *poussière*, suivant les expressions reçues : et, quoique les particules de cette poudre se touchent ou paraissent se toucher, elles ne tiennent plus les unes aux autres, et forment, non plus un solide comme auparavant, mais seulement un *amas*, comme on le voit pour le sable comparé à une masse de grès.

Rien n'est plus propre que cette considération à faire voir combien il y a loin des parties qui peuvent résulter d'une division mécanique aux véritables atomes des corps. En effet, quelque fine que soit la poudre de soufre, elle ne ressemble en rien à un liquide, tandis qu'un peu de calorique suffit pour liquéfier cette même matière.

DE L'IMPÉNÉTRABILITÉ DANS LES CORPS SOLIDES.

98. Cette propriété (19) n'est jamais plus apparente et plus sensible que dans les corps solides. Un marteau n'en-

fonce un clou que par suite de son impénétrabilité; une bille n'en chasse une autre que parce que les deux billes ne sauraient occuper la même place: mais on se tromperait beaucoup si l'on croyait que cette propriété se bornât à cette impénétrabilité de masse, car celle-ci ne tient qu'à une circonstance particulière que l'on nomme *Dureté*. En effet, si le clou n'entre pas dans le marteau, il entre dans le bois; et si la bille était molle, l'autre la pénétrerait plus ou moins : il faut donc bien entendre que l'impénétrabilité appartient plutôt à la matière même, ou aux dernières particules des corps, qu'à ces corps mêmes, en tant qu'ils présentent un certain volume. En effet, si les corps solides en masse sont impénétrables les uns pour les autres, il n'en est pas de même pour les liquides, pour les gaz et pour les fluides impondérables; ce qui tient à leur porosité (94) : si l'on mouille un morceau de sucre, l'eau est promptement absorbée, le sucre devient et plus dur et plus pesant; mais il est facile de se représenter que l'eau ne pénètre que dans les vides ou les pores du sucre, en sorte que le morceau de sucre est *pénétrable*, quoique les molécules du sucre soient *impénétrables*.

CHAPITRE II.

DE L'ATTRACTION DANS LES CORPS SOLIDES.

99. L'attraction, considérée en général, s'exerce entre les corps solides suivant les lois que nous avons exposées (60), et sans que leur état particulier d'agrégation paraisse influer en rien sur des phénomènes qui se passent dans un grand éloignement réciproque des corps en action. Ainsi

la partie liquide du globe terrestre et les fluides aériformes qui l'entourent, éprouvent l'attraction solaire et concourent à produire celle qui retient la lune dans son orbite, comme les parties solides de ce même globe. La similitude est telle, que les planètes pourraient être entièrement liquides sans que le système céleste fût changé, et qu'on a pu même supposer que les comètes étaient exclusivement formées de vapeurs.

Il n'en est pas de même dans les phénomènes d'attraction qui se passent à de très petites distances, ou au contact des corps; car alors la forme et la consistance de ces corps peuvent influer considérablement sur les phénomènes. C'est pourquoi il devient nécessaire d'étudier spécialement dans les corps solides, le *poids*, l'*adhésion* et la *cohésion*, avec toutes leurs circonstances.

DU POIDS DANS LES CORPS SOLIDES.

100. Nous avons distingué (69), (70), le *poids absolu* du *poids spécifique*. Le poids absolu des corps solides résulte, comme nous l'avons dit en général, de la somme des puissances de pesanteur agissant sur toutes les particules matérielles qui composent le corps. Nous avons seulement ici à remarquer que dans un corps solide, où toutes les particules sont liées les unes aux autres, les différentes forces qui animent les particules ne sauraient agir les unes sans les autres; en sorte qu'une résistance appliquée à un certain nombre de ces particules, ou même à une seule, reçoit la somme d'action de toutes les particules, et les arrête toutes comme si chacune d'elles était combattue à part. C'est ainsi qu'une masse de plomb peut être suspendue par un fil attaché à l'un des points de cette masse. *La somme des forces de la pesanteur, ou le poids du corps*, s'exerce

alors sur ce seul fil et par l'entremise d'un seul point, attendu que toutes les particules étant liées entre elles, ne peuvent se mouvoir indépendamment de la particule unique qui est fixée. Par la même raison, si l'on suppose un parallélipipède solide qui repose sur une de ses grandes faces, la somme du poids sera répartie entre les différens points de cette face; et si l'on vient à poser le corps sur une face moitié plus petite, la somme du poids répartie dans une étendue moitié moindre sera d'autant plus forte sur chaque point; d'où il résulte que, quand un corps solide repose sur un plan, la pression produite par le poids sur chacun des points de la base est en raison inverse de l'étendue de cette base.

Les corps solides, et surtout les métaux, présentant une assez grande résistance à leur destruction, conservant la figure qu'on leur donne, et présentant un grand poids sous un petit volume, c'est avec eux que l'on construit les *poids* proprement dits, ou les corps pesans qui servent d'objet de comparaison pour les autres corps.

DU POIDS SPÉCIFIQUE DES SOLIDES.

100. Ce que nous avons dit (70) du *poids spécifique* s'applique exactement aux corps solides en particulier, et nous savons que, pour ces sortes de corps, on a choisi l'eau pour point de comparaison; mais les méthodes à l'aide desquelles on obtient le poids spécifique des corps solides leur sont particulières.

On conçoit que si l'on taillait avec beaucoup d'exactitude des cubes parfaitement semblables de tous les corps solides dont on veut reconnaître le poids spécifique, et qu'on les pesât exactement, on obtiendrait des poids différens pour chacun; et qu'en comparant ces poids avec celui d'un cube

d'eau semblable, on aurait le poids spécifique rapporté à celui de l'eau.

Cette méthode est extrêmement difficile d'exécution, et souvent même tout à fait impossible; mais il existe un autre moyen de trouver le poids exact d'un certain volume d'eau parfaitement égal au volume d'un corps donné, et ce moyen n'exige pas que l'on donne au corps solide une forme régulière, ni même que l'on change celle qu'il présente naturellement.

Si l'on prend un flacon bouché à l'émeri, qu'on le remplisse d'eau très exactement, et qu'on replace son bouchon; si l'on pèse exactement et ensemble ce flacon ainsi rempli et le corps solide dont on veut connaître le poids spécifique; si l'on ouvre ensuite le flacon et qu'on y introduise le corps solide, il en fera sortir une certaine quantité d'eau; et si l'on replace le bouchon et que l'on sèche convenablement l'extérieur du flacon, il est évident qu'il y aura dans ce flacon moins d'eau qu'il n'y en avait, et que cette quantité d'eau soustraite aura un volume précisément égal à celui du corps solide qui l'a déplacée. Si donc on pèse de nouveau le flacon, on le trouvera plus léger que précédemment d'un poids qui sera exactement celui d'un volume d'eau égal au volume du corps solide. Par exemple, s'il était question d'un morceau d'or, si le flacon plein d'eau et le morceau d'or pesaient 78 grammes; si le morceau d'or pesait 19 grammes; si le flacon, après y avoir introduit le morceau d'or, ne pesait plus que 77 grammes, on dirait qu'un volume d'eau pesant 1, et le même volume d'or pesant 19, le poids spécifique de l'or est 19, celui de l'eau étant pris pour unité. Nous avons choisi, dans cet exemple, des nombres qui représentent exactement le rapport du poids de l'or à celui de l'eau pris pour unité, c'est-à-dire que nous avons supposé une masse d'or d'un

même volume qu'un gramme d'eau; mais dans les expériences, un semblable cas ne se présente jamais exactement, en sorte qu'il est nécessaire d'établir une proportion pour ramener le poids trouvé pour l'eau à l'unité. En nommant p le poids du volume d'eau, p' le poids du corps, en supposant 1 le point de comparaison, et nommant x le poids spécifique cherché, on a $p : p' :: 1 : x$, qui donne $x = \frac{p'}{p}$; c'est-à-dire qu'il faut, pour obtenir le poids spécifique du corps solide rapporté à celui de l'eau comme unité, diviser le poids du corps par le poids du volume d'eau déplacé : supposant donc que dans l'exemple précédent le poids du morceau d'or ait été 71^{gr}, 250, et le poids du volume d'eau déplacée 3^{gr},250, en divisant ces deux poids l'un par l'autre, on obtiendra encore le quotient 19, qui sera le poids spécifique de l'or, l'eau étant prise pour unité.

La méthode simple que nous venons de décrire n'est pas toujours susceptible d'une grande exactitude, et d'ailleurs elle ne s'applique qu'aux corps qui peuvent être introduits dans un vase à petite ouverture. Archimède en avait imaginé une beaucoup plus élégante et plus générale. On dit qu'étant chargé par le roi Hiéron de déterminer si une couronne d'or d'un travail précieux contenait de l'alliage, sans toutefois détruire le travail, il chercha long-temps en vain la solution de ce problème; mais qu'un jour étant au bain, et réfléchissant sur la perte de poids que son propre corps éprouvait lorsqu'il était plongé dans l'eau, il conçut aussitôt l'application de ce principe, et s'écria; *Je l'ai trouvé!* En effet, lorsqu'un corps solide est pesé dans l'air, et qu'on essaie ensuite de le peser pendant qu'il est plongé dans l'eau, on trouve qu'il a perdu un poids précisément égal à celui du volume d'eau qu'il déplaçait, c'est-à-dire

de son propre volume d'eau. Nous expliquerons, en parlant de l'équilibre des liquides, les raisons de ce phénomène. Voici l'application qu'on en a faite.

On suspend le corps solide, au moyen d'un fil très fin, sous le plateau d'une balance très sensible. On place dans l'autre plateau les poids nécessaires pour lui faire exactement équilibre; ensuite, au moyen d'un mécanisme particulier, à l'aide duquel la balance peut descendre à volonté, on plonge le corps solide dans un vase plein d'eau placé au dessous de lui; on trouve alors que la balance n'est plus en équilibre, et la quantité de poids qu'il faut ôter du plateau pour rétablir cet équilibre, donne le poids exact d'un volume d'eau égal à celui du corps. Il ne reste plus qu'à diviser le poids du corps par le poids du volume d'eau, pour obtenir son poids spécifique.

L'or et le cuivre ayant des poids spécifiques différens, il est évident que les alliages de ces deux métaux doivent avoir des poids spécifiques intermédiaires, qui seront d'autant plus petits qu'il y aura plus de cuivre, et d'autant plus grands qu'il y aura moins de cuivre.

Archimède avait donc en effet trouvé le moyen de déterminer la composition de la couronne sans la détruire, en la pesant successivement dans l'air et dans l'eau, après avoir fait les mêmes expériences sur le cuivre pur et sur de l'or pur. La balance qu'on emploie à ces sortes d'expériences porte le nom de *balance hydrostatique*.

Nous avons d'abord décrit cette méthode d'une manière générale; mais il y a quelques précautions à prendre pour obtenir des résultats exacts. 1° Le corps pesé dans l'air déplace aussi un volume de ce fluide, et ce volume a un poids qui est très petit, mais qui peut varier avec les températures et les pressions barométriques. Cette cause d'erreur est insensible. 2° Les corps solides que l'on plonge

dans l'eau retiennent presque toujours quelques bulles d'air adhérentes à leur surface. Il faut les en dégager avec beaucoup de soin. 3° Enfin l'eau dont on fait usage n'a pas toujours le même poids spécifique. Pour avoir des résultats comparables, il faut employer de l'eau distillée et faire des expériences toujours à la même température, ou du moins ramener par le calcul des résultats à ce qu'ils ouraient été, par exemple à 0°; ce qu'on obtient facilement par des règles que nous établirons en parlant de la dilatation des liquides par la chaleur.

Malgré la commodité de la première méthode décrite, et l'exactitude de la seconde, il est encore un certain nombre de cas qui échappent à leur application.

Si le corps dont on cherche le poids spécifique est réduit en poudre, on pourra se servir de la méthode du flacon; mais d'une part on ne sera jamais sûr d'avoir expulsé tout l'air que les particules solides peuvent entraîner, et d'ailleurs le poids spécifique d'un corps en poudre peut être fort différent de celui du même corps en masse, attendu la porosité.

Si le corps est soluble dans l'eau, il sera impossible de le peser dans ce liquide, et il faudra en employer un autre, comme l'huile par exemple, dont on aura d'abord déterminé le poids spécifique. Beaucoup de corps solides peuvent renfermer dans leur masse des espaces vides inaperçus, qui s'opposent à l'exactitude des résultats.

Enfin il peut arriver que le corps solide dont on cherche le poids spécifique soit plus léger qu'un pareil volume des liquides dont nous pouvons disposer. Tel serait, par exemple, un morceau de liége ou de moelle de sureau. Dans ce cas on peut faire usage de la méthode du flacon, en forçant le corps à entrer dans l'eau par la pression du bouchon; mais le célèbre physicien Charles a imaginé un

moyen fort ingénieux, qui consiste à faire usage d'une espèce d'entonnoir renversé et percé de beaucoup de petits trous. Cet entonnoir ayant un grand poids spécifique, et étant suspendu au fléau de la balance, on détermine d'abord sa perte en poids lorsqu'il est plongé dans l'eau, et l'on s'en sert ensuite pour obliger les corps les plus légers à plonger dans ce liquide.

On conçoit que dans les exemples que nous venons de citer, p' est plus petit que p, c'est-à-dire que le poids du volume du corps est plus petit que le poids du même volume d'eau, d'où il suit qu'on obtient, par la proportion que nous avons indiquée, pour valeur de x, une fraction d'unité.

Hassenfratz a imaginé de mesurer le poids spécifique des corps solubles dans l'eau, des sels par exemple, en en faisant dissoudre des quantités connues dans des poids connus d'eau pure, et prenant le poids spécifique de la dissolution. Il a supposé que celui-ci devrait être une moyenne proportionnelle entre celui de l'eau et celui du sel; mais cette supposition n'est pas démontrée, car il est possible que l'affinité du sel pour l'eau modifie la densité de la dissolution. Ainsi il est difficile de compter sur les nombreux résultats qu'il a publiés dans les *Annales de Chimie*.

Nous donnons ici une table du poids spécifique de quelques corps solides.

TABLE DU POIDS SPÉCIFIQUE DES PRINCIPAUX CORPS SOLIDES.

Eau prise pour unité.	1,000
Métaux.	
Cuivre jaune fondu, non forgé.	8,396.

Cuivre fondu commun	7,824.
— rouge non forgé	7,788.
Or pur fondu, non forgé	19,258.
— forgé	19,362.
— de Guinée	17,629.
Fer fondu	7,207.
— forgé	8,778.
Acier non trempé ni durci	7,833.
— durci, mais non trempé	7,840.
— trempé	7,816.
Mine de fer prismatique	7,355.
Plomb	11,352.
Mine de plomb cubique	7,587.
Mercure congelé	15,682.
— liquide	13,568.
Nickel ductile	6,807.
Platine en grain	15,602.
— purifié non forgé	19,500.
— forgé	20,337.
Argent pur non forgé	10,477.
— pur forgé	10,511.
— de Chilling	10,534.
Étain pur de Cornouailles, non forgé	7,291.
— durci	7,299.
Zinc	7,191.

Pierres dures.

Béril	3,549.
Chrysolite des joailliers	2,782.
Cristal de roche	2,653.
Diamant	3,521.
Émeraude	2,775.

Grenat.	4,189.
Rubis.	4,283.
Saphyr.	3,994.
Spath fluor.	2,595.
Topaze.	4,011.
Agate onix.	2,638.
Silex.	2,594.
Jaspe.	2,816.
Opale.	2,114.
Perle.	2,684.

Minéraux divers.

Albâtre.	2,730.
Ambre jaune.	1,078.
Ambre gris.	0,926.
Basalte.	2,864.
Brique.	2,000.
Chaux.	2,784.
Chaux sulfatée.	2,168.
Verre vert.	2,642.
Verre blanc.	2,892.
Verre à bouteille	2,733.
Granit égyptien.	2,654.
Pierre à rasoir.	2,876.
Pierre à chaux.	3,179.
Marbre.	2,742.
Porphyre.	2,765.
Pyrite.	4,954.
Terre argileuse.	2,672.

Bois.

Chêne frais.	0,930.

Chêne sec.	1,670.
Hêtre.	0,852.
Prunier.	0,785.
Sapin.	0,550.
Ébène.	1,331.
Acajou.	1,063.
Peuplier.	0,383.
Liége.	0,240.

DE L'ADHÉSION ENTRE LES CORPS SOLIDES.

102. Nous avons vu (76) que les liquides et les solides étaient susceptibles d'*adhérer* par les surfaces, et que cet effet devait être attribué à l'attraction générale. Ce genre de phénomènes présente, dans les corps solides, des modifications qu'il importe de connaître.

Si l'on rapproche deux surfaces solides qui ne présentent qu'un poli grossier, il n'y aura jamais aucune adhérence sensible; et si le poli est plus parfait, l'adhérence commencera et deviendra d'autant plus forte que les surfaces se toucheront réellement par un grand nombre de points: mais on remarque qu'en approchant parallèlement deux surfaces polies, elles ne contractent point d'adhérence, tandis que celle-ci se développe si l'on presse fortement les deux surfaces, ou mieux encore si on les fait glisser l'une sur l'autre en les pressant. Cette différence tient à l'existence d'une petite couche d'air adhérente aux surfaces, qui s'oppose à leur contact, et qu'on expulse par la pression. Elle tient aussi à ce que les surfaces, n'étant jamais rigoureusement planes, ne se touchent réellement dans tous leurs points que quand on les comprime.

On observe encore que si l'on mouille les deux surfaces, elles adhèrent immédiatement, mais avec une intensité

médiocre et constante qui représente plutôt l'adhérence du liquide lui-même que celle des surfaces solides. Néanmoins, si les deux surfaces humides sont pressées, leur adhérence arrivera promptement à un *maximum;* 1° parce que l'eau expulse immédiatement la couche d'air adhérente; 2° parce que les molécules d'eau qui peuvent se loger entre les petites saillies que présente encore la surface solide la plus polie, rendent les points de contact plus nombreux.

L'adhérence une fois établie entre deux surfaces solides, on observe qu'elle augmente avec le temps, ce que l'on attribue à de légères oscillations des particules des corps solides, par suite desquelles les petites saillies pénètrent dans de petits enfoncemens opposés, ce qui multiplie encore les points de contact.

On n'observe d'adhérence sensible qu'entre des corps solides dont la densité est considérable, comme les métaux ou le verre, par exemple; mais on ne peut faire adhérer par simple rapprochement les corps poreux, comme le bois, le papier, le liége, etc. Cette difficulté a donné naissance à des artifices particuliers, pour déterminer à volonté des adhérences entre toutes sortes de corps : on emploie pour cela des substances intermédiaires qui portent le nom de *colles*.

On peut dire en général qu'une colle n'est autre chose qu'un corps actuellement liquide, qui pourra devenir solide, soit par l'évaporation de l'eau, soit par le simple refroidissement, soit enfin par l'imbibition. Cela posé, étant données deux surfaces de corps poreux que l'on veut réunir, on les couvre d'une couche de colle, et on les applique l'une sur l'autre; il se produit une première adhérence du même ordre que celle des surfaces solides mouillées; mais le liquide disparaissant peu à peu par une des causes que nous venons d'indiquer, les particules solides se rapprochent et finissent

par adhérer très fortement. On doit se représenter la couche solide que la colle a laissée entre les deux corps, comme offrant sur ces deux faces le moule exact des nombreuses inégalités que présentent toujours les corps solides poreux, et c'est précisément cette disposition qui multiplie suffisamment les points de contact pour produire une adhérence énergique.

Si l'emploi de la colle a été accompagné d'une forte compression, comme il arrive dans le collage des bois avec la colle forte, l'intensité de l'adhérence peut excéder la ténacité de la colle elle-même; car cette intensité se compose, 1° de l'adhérence d'un certain nombre de particules du corps solide qui se trouveront réellement en contact; 2° de l'adhérence de la matière solide déposée par la colle, et qui remplira les intervalles que la porosité laisse entre les particules.

La marche de la cicatrisation dans les plaies présente un exemple frappant des phénomènes que nous venons d'exposer; à la suite d'une plaie il s'épanche un fluide qui remplit l'intervalle des lèvres de cette plaie, pourvu qu'il ne soit pas trop grand : dès lors il y a adhérence fluide et très légère, le liquide se coagule, l'adhérence devient plus solide, l'absorption enlève peu à peu le corps intermédiaire, multiplie ainsi les points de contact, et diminue l'épaisseur de la couche; et jusque là la cicatrice ne présente qu'une adhérence physique : enfin la substance intermédiaire s'organise et la cicatrice devient une continuité.

L'adhérence primitive molle qui suffit à la première cicatrisation des parties molles aurait été bien insuffisante pour les os; aussi le cal provisoire est-il destiné à en maintenir l'immobilité, jusqu'à ce qu'elle soit devenue adhérence solide.

DE LA COHÉSION DANS LES CORPS SOLIDES.

103. Nous n'avons rien à ajouter à ce que nous avons dit (78) en général sur la cohésion; et nous savons qu'elle consiste dans les corps solides en une modification de l'attraction, qui s'oppose non seulement à l'écartement de leurs particules, mais encore à leur changement de rapports entre elles ou à leurs déplacemens réciproques. Il nous reste à étudier les modifications particulières que présente la cohésion dans les corps solides, et que l'on regarde comme des propriétés particulières à cette classe et plus ou moins prononcées dans les différentes espèces. Nous examinerons donc successivement la *ténacité*, la *dureté*, la *ductilité*, l'*élasticité*, la *compressibilité*, la *flexibilité* et l'*extensibilité*.

DE LA TÉNACITÉ.

104. On entend par ténacité cet effet de la cohésion qui s'oppose à ce que les particules d'un corps solide soient directement écartées les unes des autres par des tractions opposées. On voit par cette définition que cette propriété est en quelque sorte l'expression de la cohésion proprement dite; et l'on peut observer en effet qu'elle existe dans les liquides comme dans les solides, puisque dans l'un et l'autre cas il faut employer une force appréciable pour arracher les molécules les unes aux autres.

La connaissance du degré de ténacité des différens corps étant d'une grande importance dans les sciences et dans les arts, on a dû faire beaucoup de recherches pour la déterminer avec exactitude. On s'est servi en général d'un procédé fort simple, qui consiste à prendre un corps

d'une forme allongée, à le fixer par une de ses extrémités en suspendant à l'autre des poids successivement croissans jusqu'à produire la rupture du corps en travers. On a reconnu par ces expériences que la longueur du corps n'influait presque point, comme il était facile de le prévoir, sur la résistance qu'il opposait; mais que cette résistance était exactement proportionnelle à ses deux autres dimensions, c'est-à-dire à la surface de sa coupe transversale; en sorte, par exemple, qu'un fil métallique cylindrique de deux millimètres de diamètre offre une résistance quatre fois plus considérable que celle d'un autre fil du même métal qui n'aurait qu'un millimètre de diamètre.

La ténacité étant particulièrement remarquable dans les substances métalliques, on l'a aussi particulièrement étudiée dans ces sortes de corps. On s'est servi de fils de deux millimètres de diamètre, et on a obtenu les résultats suivans:

Le fer supporte avant de se rompre un poids de	249k,659
Le cuivre.	137,399
Le platine	124,690
L'argent.	85,062
L'or.	68,216
L'étain	24,200
Le zinc.	12,720
Le plomb.	9,750

On voit par cette table que les métaux diffèrent considérablement les uns des autres par leur ténacité; et si on la compare avec la table des poids spécifiques (101), on trouve que les métaux qui présentent le poids spécifique le plus considérable ne sont pas ceux qui présentent la plus forte ténacité, puisque le fer, un des plus légers, est le plus te-

nace de tous; tandis que le plomb, un des plus pesans, est celui qui offre la plus faible ténacité. Cette singulière opposition s'explique en grande partie par l'observation suivante : les métaux jouissent, à des degrés différens, d'une propriété que nous connaîtrons sous le nom de *ductilité*, qui les rapproche, jusqu'à un certain point, de la condition du liquide, en ce qu'elle permet à leurs molécules de glisser les unes sur les autres avec plus ou moins de facilité. En conséquence, lorsqu'on suspend des poids à un fil métallique de deux millimètres de diamètre, ce fil éprouve un allongement qui dépend de la ductilité et qui lui est proportionnel. Mais cet allongement ne saurait avoir lieu sans que le diamètre du fil soit diminué; et comme la ténacité est proportionnelle aux dimensions transversales, le fil doit se rompre d'autant plus facilement qu'il a été plus allongé, conséquemment plus aminci. Aussi observe-t-on que les extrémités qui répondent à la rupture ont un diamètre beaucoup plus petit que celui du fil primitif.

L'arrangement particulier des molécules du métal peut modifier considérablement sa ténacité : celui qui a été fondu, et dont la texture est grenue ou lamelleuse, offre beaucoup moins de résistance que celui qui a été forgé et dont la texture est fibreuse. Aussi le fer forgé est-il, sous ce rapport, bien supérieur à la fonte de fer.

La ténacité a été étudiée avec quelque soin par Muschenbroeck, sur les différens bois qui servent aux constructions. Mais dans ce genre de corps, qui offre une texture si bien caractérisée, il est fort important de distinguer dans quel sens on exerce les tractions. La ténacité est très faible quand on agit transversalement aux fibres du bois; elle est très considérable dans le sens de leur longueur. Le chêne et le hêtre l'emportent de beaucoup sur tous les autres bois par cette propriété.

Les cordes dont le tissu est tordu présentent une ténacité sur laquelle le même physicien a fait beaucoup de recherches. Elle est en général beaucoup moindre que la ténacité totale de toutes les fibres supposées parallèles. Cependant la torsion est indispensable, car il serait impossible de faire supporter également une traction donnée par un très grand nombre de fils parallèles. A la moindre différence de longueur, quelques fibres supporteraient tout l'effort à elles seules, et par conséquent elles se rompraient toutes successivement. La torsion a pour objet de distribuer l'effort à peu près uniformément entre toutes les fibres; elle est donc indispensable. Mais puisqu'elle diminue la somme des résistances, elle doit être bornée; et l'on estime en général qu'une corde doit être tordue de manière à raccourcir d'un cinquième seulement.

Parmi les circonstances qui peuvent modifier le degré de ténacité des corps, l'action répulsive du calorique accumulé dans leur intérieur joue le principal rôle. Cette influence est surtout remarquable dans les métaux : lorsqu'ils sont rouges de chaleur, leur ténacité est considérablement diminuée; elle devient presque nulle quand ils approchent de leur terme de fusion. Le calorique agit ici, d'après les principes que nous avons posés (80), comme antagoniste de la cohésion.

Il n'y a pas de propriété physique qui présente des modifications plus remarquables que la ténacité, quand on la compare dans les corps bruts, dans les tissus organisés, mais privés de la vie, et enfin dans ces mêmes tissus vivans. Ces différences sont tellement saillantes qu'elles ont fourni un de leurs argumens les plus spécieux aux physiologistes qui ont cherché à établir que la matière n'obéissait pas, dans les corps vivans, aux lois de la nature morte; il devient donc essentiel d'examiner les faits et de chercher s'ils

sont intelligibles et explicables par les lois ordinaires de la nature, auquel cas nous serons autorisés à rejeter les prétendues explications fondées sur une influence vitale inintelligible elle-même.

D'abord on observe constamment que les tissus organiques ont une ténacité beaucoup plus grande que les corps bruts, proportions gardées entre les volumes et les densités; mais il est remarquable que cette augmentation de ténacité n'a jamais lieu que dans un seul sens, et au détriment de cette propriété dans les autres directions. Après avoir noté qu'une masse de métal fondu a une ténacité égale dans tous les sens; qu'un morceau de fer forgé, et surtout passé à la filière, présente une ténacité plus considérable dans le sens de sa longueur, mais qu'elle se trouve diminuée transversalement; que le métal offre même souvent des gerçures longitudinales; on voit qu'un morceau de bois de sapin offre, relativement à sa densité, une ténacité très considérable, suivant sa longueur; mais elle est si faible transversalement, que les particules semblent à peine adhérentes les unes aux autres, ce qui donne à ce corps la faculté de se fendre, comme on dit vulgairement, avec une grande facilité. Il est évident que les variétés que nous venons de citer dépendent d'un certain arrangement des particules qui peuvent se trouver très rapprochées dans un certain sens et rangées en lignes droites, ce qui constitue des fibres qui sont au contraire plus écartées les unes des autres dans le sens de l'épaisseur du corps. Il suffit de ce plus grand rapprochement des particules dans une direction donnée, pour expliquer l'accroissement de la force de cohésion dans cette même direction, et conséquemment tous les effets de la texture fibreuse.

Un phénomène plus remarquable encore se rencontre dans les animaux. Un tendon ou une aponévrose qui sert

à transmettre l'action d'un muscle, supporte fréquemment, sans se rompre, dans la contraction de ce muscle, des efforts qui paraissent bien supérieurs à ce que peuvent supporter des corps fibreux analogues dans nos expériences de physique ou de mécanique. Pour concevoir les raisons de ce phénomène, il faut se rappeler ce que nous avons dit plus haut, qu'une corde tordue quelconque était loin de pouvoir supporter la somme totale des efforts partiels qui pourraient l'être par chacun des fils de chanvre qui entrent dans sa composition; mais que cette torsion devient indispensable dans les moyens grossiers de nos arts, parce que nous ne savons pas distribuer uniformément une force quelconque, de manière à ce qu'un millier de fils de chanvre, par exemple, en supportent exactement chacun leur part. Or, ce problème, que nos arts mécaniques ne savent point résoudre, l'a été complètement par la nature dans la structure des corps musculaires. En effet, ce n'est point l'effort total d'un muscle donné qui se transmet en masse à son tendon; chacune des fibres qui composent le corps charnu du muscle est en continuité avec une fibre tendineuse particulière qui s'étend jusqu'au point d'attache du tendon, en sorte que, dans la contraction complète du corps musculaire, la force de chaque fibre est transmise par sa petite corde tendineuse isolée. Aussi arrive-t-il que, dans les contractions irrégulières ou convulsives d'un muscle, quelques unes de ses fibres se rompent pendant que les autres restent intactes.

Cette seule considérasion nous paraît suffire pour expliquer la résistance extraordinaire que semblent offrir les corps fibreux vivans.

Il nous reste à examiner une dernière question un peu plus difficile à résoudre, et qui a paru au célèbre Barthès un motif suffisant pour imaginer, dans les muscles, une

puissance particulière, qu'il a nommée *force de situation fixe.* Voici le fait dont il est question ?

Il est certain que si l'on évalue la force de contraction d'un muscle quelconque chez un individu vivant, et qu'ensuite, agissant sur un cadavre, et conservant toutes les attaches et toute l'intégrité de ce même muscle, on lui fasse subir des tractions mécaniques, le corps charnu se déchirera par ses efforts bien avant qu'on ait déployé une puissance égale à la force de contraction que le muscle possédait pendant la vie, et dont les fibres supportaient conséquemment les effets sans se rompre.

Pour entendre ce phénomène compliqué, il faut distinguer deux cas : 1° le temps de la contraction du muscle ; 2° le temps de son relâchement.

Dans le cas de contraction, ce phénomène ne pouvant s'entendre que par une puissance vitale qui rapproche les particules du muscle et raccourcit ses fibres, il est certain d'abord que la force de contraction, quelle que soit sa valeur, s'ajoutera à la cohésion ordinaire des fibres ; ensuite que les particules de la fibre musculaire, rapprochées par la contraction, éprouveront nécessairement une augmentation dans leur cohésion propre. Ainsi l'accroissement de résistance à sa déchirure que présente un muscle actuellement contracté, est un fait simple et une conséquence nécessaire de la contraction même.

Il reste le second cas, savoir : qu'un muscle vivant non contracté est plus difficile à déchirer qu'un muscle mort.

Il est nécessaire de se rappeler ici que toutes les parties de l'économie animale, et principalement les corps musculaires, sont composés d'un nombre infini de vaisseaux déliés dont les parois très minces contiennent des fluides ; la résistance que l'organe mou oppose à son déchirement est représentée par la somme des résistances de toutes ses

parois vasculaires. Dans le muscle vivant, tous ces vaisseaux sont pleins de fluides actuellement poussés par les agens de la circulation, et leurs parois sont par conséquent dans un état de tension et de gonflement général ; dans le muscle mort il n'y a plus de tension vasculaire, et les parois des vaisseaux deviennent flasques. Or, c'est une propriété des liquides de transmettre les efforts uniformément dans tous les sens ; en sorte que dans une traction exercée sur un muscle vivant, il n'y a pas une des petites membranes qui composent les vaisseaux ou les aréoles du tissu laminaire, qui ne supporte une part de l'effort général ; tandis que, dans le muscle mort, les portions membraneuses qui se trouvent avoir une direction longitudinale, supportent d'abord seules l'effort, et se rompent avant que les autres parties aient pu venir partager leur résistance.

Nous rendrons cette explication plus évidente par un exemple que nous avons déjà cité.

On est dans l'usage de tordre les cordes de chanvre pour augmenter leur ténacité; dans cet état, lorsqu'elles supportent une traction, elles tendent à diminuer de diamètre. Les spirales extérieures compriment le noyau de la corde, et une grande partie des fibres se trouvent tendues simultanément pour résister à l'effort. Plus la corde tendue aura de dureté, et plus elle offrira de résistance : si on l'a laissée se sécher long-temps à l'air ou au soleil elle aura perdu une grande partie de sa force ordinaire ; mais si on la mouille, toutes ses fibres arrivant à un état de gonflement analogue dans ses effets à l'injection capillaire d'un muscle, la corde reprendra toute sa résistance première.

Ainsi le muscle vivant doit offrir beaucoup plus de résistance à la déchirure que le muscle mort, sans qu'il

soit nécessaire de faire intervenir l'action d'une puissance spéciale; c'est une suite nécessaire de son état physique actuel.

DE LA DURETÉ.

105. On entend en physique, par *dureté*, la propriété relative des corps solides de se laisser user ou rayer les uns par les autres. Par exemple, on dit que le verre est plus dur que le marbre, parce qu'un morceau de verre anguleux entame et raye un morceau de marbre uni; parce que du verre en poudre use un morceau de marbre à l'aide du frottement. Le verre à son tour est rayé par le cristal de roche, qui l'est lui-même par plusieurs autres pierres, et surtout par le diamant, qui n'est rayé par aucun autre corps, et qui présente pour nous le *maximum* de la dureté.

Il est important de distinguer la dureté d'une grande masse, de la dureté des petites parcelles; car un morceau de charbon est facilement rayé par tous les corps durs, et la poussière de charbon peut être employée à polir des corps très durs. Il en est de même de la pierre ponce.

Quand on recherche les causes de la dureté telle que nous venons de la définir, il est très difficile de les apprécier : en effet, la dureté n'est nullement proportionnelle à la densité des corps, puisque le diamant, qui est le plus dur de tous, a un poids spécifique beaucoup moindre que celui du plomb, qui est un des plus mous. La dureté ne dépend pas même de la nature intime ou de la composition chimique du corps; car le saphir, qui est un des corps les plus durs que nous connaissions, est formé d'alumine, qui ne présente dans ses autres états qu'une dureté très médiocre; il en est de même du diamant comparé au carbone noir. Cette propriété semble donc dépendre à la fois de la nature

des molécules, de leur degré de rapprochement et de leur arrangement.

La dureté peut varier considérablement dans un même corps, sans qu'il paraisse avoir éprouvé du reste aucun changement notable. Si l'on prend un morceau d'acier, c'est-à-dire de fer combiné avec une très petite proportion de carbone, on trouvera sa dureté à peu près égale à celle du fer ordinaire; mais si l'on chauffe ce morceau d'acier, et qu'on le refroidisse plus ou moins rapidement en le plongeant dans l'huile, dans l'eau, dans le mercure, etc., ce morceau d'acier aura acquis une dureté très considérable, et sera devenu capable de rayer et d'entamer le fer avec beaucoup de facilité. Le degré de dureté de l'acier sera proportionnel à l'élévation primitive de sa température et à la rapidité de son refroidissement. Ce même morceau d'acier perdra complètement cette dureté accidentelle, si on le chauffe de nouveau et qu'on le laisse refroidir lentement. Les physiciens ont inutilement cherché jusqu'ici l'explication de ce singulier phénomène. Les théories qui ont été données sont d'autant moins admissibles, qu'il est des substances métalliques qui présentent un phénomène directement contraire.

On connaissait depuis long-temps en Europe des cymbales fabriquées en Orient, sur lesquelles on remarquait des empreintes de coups de marteau, qui supposait un état de ductilité, quoique le corps fût au contraire susceptible de se briser par le choc. M. D'Arcet a découvert, par le rapport d'un ancien ouvrier de la Monnaie qui avait travaillé aux sous fabriqués avec le métal des cloches, que l'alliage de cuivre et d'étain, qui forme les cymbales, a la propriété de devenir dur et cassant quand on le laisse refroidir lentement, et de conserver au contraire beaucoup de mollesse et de ductilité quand on le refroidit tout à coup.

Il est important de rectifier quelques idées peu exactes,

qui sont assez généralement répandues, sur l'acception du mot *dureté*. On croit ordinairement que plus un corps est dur, mieux il doit résister au choc, et il arrive presque toujours directement le contraire ; en sorte que la *fragilité* est la compagne ordinaire de la dureté proprement dite. Le diamant, qui raye tous les autres corps, se brise sous un léger choc; le verre, qui sert de type à la fragilité, est beaucoup plus dur que le fer. Enfin l'acier, en prenant par la trempe cette dureté si remarquable dont nous venons de parler, devient en même temps d'autant plus cassant qu'il est plus dur.

La dureté est un caractère physique important dont on fait un grand usage en minéralogie pour distinguer les composés naturels les uns des autres. Elle n'est pas moins essentielle, particulièrement dans les métaux, relativement aux usages mécaniques que l'on peut en faire. Aussi a-t-on cherché à la déterminer avec quelque exactitude, mais sans y avoir jusqu'à présent complètement réussi. Peut-être la meilleure méthode de mesurer cette propriété consisterait-elle à user, au moyen d'une meule, des parallélipipèdes des différens métaux pendant un temps égal et sous la même pression; la quantité de matière enlevée donnerait la proportion de la dureté relative.

Autant qu'on peut en juger par le peu de recherches qu'on a faites jusqu'à présent sur cet objet, les métaux peuvent se ranger, sous le rapport de leur dureté, dans l'ordre suivant : tungstène et palladium, manganèse, fer, platine, cuivre, argent, bismuth, or, zinc, antimoine, cobalt, étain, arsenic, plomb, sodium et potassium.

DE LA DUCTILITÉ.

106. La ductilité est cette propriété des corps solides en vertu de laquelle ils peuvent être susceptibles de changer

de forme par des efforts plus ou moins grands, et sans que l'agrégation de leurs molécules en soit diminuée. Ainsi la cire est *ductile*, l'or est *ductile*, le verre et l'acier trempé sont *aigres* ou *cassans*.

Toutes les substances qui sont naturellement molles ou qui peuvent le devenir à une très légère chaleur, comme la cire, la gomme laque et les graisses, peuvent être considérées comme des corps facilement ductiles; mais cette expression s'applique plus particulièrement aux substances métalliques.

Il faut distinguer avec soin le genre d'effort par lequel on essaie de changer la forme d'un métal. Si après l'avoir formé en cylindre, on l'oblige à passer par des trous percés dans une lame d'acier, et dont les diamètres vont en diminuant, on parvient à diminuer le diamètre du cylindre et à obtenir des fils plus ou moins fins. On conçoit que la ductilité est ici mise en jeu par une pression circulaire; et si l'on fait passer le même métal entre deux cylindres d'acier, on pourra le réduire en feuilles, et ce sera encore une pression successive qui aura déterminé le déplacement des molécules. Si l'on place le métal sur une enclume, et qu'on le frappe avec un marteau, on changera sa forme par l'effort puissant et subit qu'on appelle *choc*.

Quoique tous les métaux qui jouissent de la ductilité soient susceptibles de céder à ces différens modes d'action, ils se prêtent cependant plus ou moins bien à l'un ou à l'autre. Ainsi, pour qu'un métal puisse être réduit en fil très fin, il faut nécessairement qu'il présente, indépendamment de la ductilité, une ténacité très considérable, puisqu'il faut que le fil résiste à l'effort de traction que l'on fait pour l'obliger à passer dans la filière. C'est à ce mode d'extensibilité qu'on applique plus particulièrement le mot *ductilité*. Si le déplacement des particules est déterminé

par des coups de marteau, le métal ne s'y prêtera qu'autant qu'il aura beaucoup de densité ou une grande cohésion, car ce mode d'action tend à séparer brusquement les particules les unes des autres. On nomme spécialement *malléabilité* la faculté de se laisser réduire en feuilles par le choc.

On a imaginé dans les arts beaucoup de procédés ingénieux pour obtenir des feuilles très minces de certains métaux. Par exemple, le choc immédiat du marteau brisant avec facilité les feuilles d'or que l'on essaie d'amincir, on en place un certain nombre les unes sur les autres, en interposant des feuilles de baudruche. L'effet du choc est alors adouci, et les feuilles s'étendent toutes à la fois, autant que le permet la grandeur des feuilles de baudruche superposées. On décompose alors le livret, on coupe toutes les feuilles d'or en quatre, et on les replace dans le milieu de l'espace; on continue à frapper, et l'on répète la même opération jusqu'à obtenir des feuilles d'or tellement minces qu'un grain d'or fournit cinquante pouces carrés.

Si l'on se rappelle que le calorique, en pénétrant un corps solide, peut écarter ses particules au point de le rendre liquide, ou de le mettre dans un tel état que toutes ses molécules puissent se mouvoir librement les unes sur les autres, on concevra que la température doit influer beaucoup sur la ductilité en général et sur celle des métaux en particulier. On voit, en effet, que le fer se forge ou se lamine très aisément quand il est porté au rouge-blanc, et que le zinc, qui est cassant à froid, est ductile à la température de 100°; mais comme la ductilité suppose que les particules sont capables de persister dans la nouvelle situation où on les a placées, il en résulte que cette propriété disparaît en quelque sorte dans les métaux lorsqu'ils approchent de leur terme de fusion. C'est pourquoi le plomb et

l'étain sont plus ductiles à la température ordinaire que quand on les chauffe.

Pendant l'action des différens efforts que l'on emploie pour changer la forme des métaux, il arrive en général que leur densité s'accroît. Aussi leur poids spécifique se trouve-t-il plus grand après ces opérations qu'auparavant. Il arrive encore que leur contexture se modifie d'une manière remarquable : elle tend à prendre la forme fibreuse; et lorsqu'on essaie, à coups de marteau, de réduire en feuilles un morceau de fer ou de plomb, il se forme bientôt des fentes ou des gerçures, suivant la direction de ces fibres. Cette disposition est cause que la ductilité diminue considérablement dans certains métaux lorsqu'on les passe à la filière, qu'on les lamine ou qu'on les frappe. Ils contractent alors de la dureté, de l'élasticité et une sorte de fragilité; on nomme cet état *écrouissement* des métaux. On y remédie par l'opération qu'on nomme *recuit*, et qui consiste à les chauffer jusqu'à la température rouge : il paraît qu'alors les molécules du métal reprennent leur arrangement primitif avec toute leur ductilité première. L'or, l'étain et le plomb n'éprouvent pas d'écrouissement sensible.

D'après ce que nous avons dit des circonstances qui modifient la ductilité, on ne peut déterminer ces degrés dans les différens métaux qu'en tenant compte de ces circonstances. Ainsi, sous le rapport de la faculté de se laisser étendre en fils très fins, on peut les ranger dans l'ordre suivant : platine, argent, fer, cuivre, or, zinc, étain, plomb.

Comme susceptibles de se réduire en feuilles très minces, avec les précautions que nous avons indiquées, ils se rangent dans l'ordre suivant : or, argent, cuivre, étain, plomb, zinc, platine, fer.

Enfin sous le point de vue général de la facilité avec

laquelle les métaux en masse cèdent à l'impression d'un choc, on les trouve rangés dans un ordre tout différent, savoir : plomb, étain, or, zinc, argent, cuivre, étain, platine, fer.

La ductilité est sans doute une des propriétés les plus précieuses que possèdent les métaux, et c'est à ce titre que les anciens donnaient le nom de *métaux parfaits* à ceux qui en étaient doués à un très haut degré. Mais ce grand avantage est pourtant accompagné de quelques inconvéniens. Les métaux très ductiles, comme l'or, l'argent et le plomb, ont une sorte de mollesse et de flexibilité qui leur permet de céder au moindre effort, et qui les rend peu propres à conserver des formes déterminées. Heureusement l'art des alliages nous apprend à corriger ces imperfections. L'or et l'argent des monnaies conservent long-temps leurs formes et leurs empreintes, parce qu'ils sont alliés d'un dixième de cuivre. La proportion de ce métal étranger est encore plus considérable dans la vaisselle et les bijoux.

DE L'ÉLASTICITÉ.

107. On nomme *élasticité*, dans les corps solides, cette propriété en vertu de laquelle leurs molécules déplacées reviennent ensuite plus ou moins vite, et complètement, à leur première situation.

Si d'une hautenr quelconque on laisse tomber une bille d'ivoire sur un plan de marbre, on observe que la bille se relève après avoir frappé le plan, tandis qu'une bille d'argile ou de plomb le frappe et y reste appliquée. C'est à l'élasticité qu'on attribue le mouvement opposé à la chute, qui se manifeste dans la bille d'ivoire.

Les physiciens ont expliqué diversement ce genre de phénomènes. Pour le concevoir, il faut se rappeler : 1° que

dans les corps solides les particules sont situées, les unes par rapport aux autres, dans des rapports qui dépendent d'une sorte d'équilibre entre la force de cohésion et la puissance répulsive du calorique; 2° que les corps présentent divers degrés de ténacité, ou qu'il est plus ou moins difficile d'arracher complètement leurs molécules les unes aux autres; 3° que la propriété que nous avons nommée dureté, met obstacle non seulement à ce que les particules soient tout à fait séparées, mais encore au déplacement de ces particules; 4° que la ductilité, au contraire, permet aux molécules de se déplacer réciproquement, en cédant à des efforts plus ou moins énergiques.

Dans cet état de choses il peut arriver que, malgré la ténacité et la dureté d'un corps, ses molécules soient tout à coup dérangées de la situation qu'elles occupaient les unes par rapport aux autres, mais seulement d'une très petite quantité, en sorte que ses molécules ne soient pas pour cela complètement soustraites à l'action des forces qui les maintenaient en équilibre, ce qui produirait la fracture du corps. Cela étant, si la cause de déplacement cesse d'agir, les molécules reviendront à leur première position; et comme elles auront, en y arrivant, un mouvement acquis, elles la dépasseront pour se porter du côté opposé, et ainsi successivement, par des oscillations décroissantes, jusqu'à l'état de repos; à peu près comme il arrive à une corde tendue entre deux points fixes, que l'on pince dans son milieu, et qui vibre pendant un certain temps.

En se représentant ainsi les phénomènes de l'élasticité, on en conçoit aisément toutes les circonstances et toutes les modifications.

On peut dire qu'il existe, dans les corps solides, deux genres d'élasticité bien distincts. En effet, les corps durs et élastiques éprouvent les vibrations dont nous avons parlé,

avec une telle rapidité, que les effets de l'élasticité paraissent instantanés : c'est ce qui arrive dans le choc de deux billes d'ivoire. Les corps mous et élastiques exigent, au contraire, un temps assez long pour revenir à leur forme première, quand elle a été modifiée; aussi verrons-nous, en parlant du choc de ces corps, qu'il se perd une grande quantité de mouvement dans le jeu de leur élasticité.

L'élasticité a des degrés dans les différens corps, quoiqu'ils en jouissent tous plus ou moins; on nomme *élasticité parfaite*, celle dans laquelle le corps dont on a changé la forme revient complètement à son état primitif, comme il arrive à un ressort d'acier, à une bille d'ivoire, etc. On nomme *élasticité imparfaite* celle que présentent la plupart des corps ductiles; il faut seulement remarquer que le retour plus ou moins complet à l'état primitif dépend en grande partie de l'intensité de la force qui a changé la forme du corps. Par exemple, si l'on courbe en demi-cercle une lame d'acier, elle redevient ensuite parfaitement droite : si l'on courbe de même une lame de cuivre, elle ne se redresse qu'imparfaitement; et si l'on emploie une lame de plomb, elle conserve à très peu près la courbure qu'on lui a donnée; mais si l'on ne fait subir à la lame de cuivre qu'une demi-flexion, elle pourra revenir complètement à la direction droite; et si la lame de plomb elle-même n'a été fléchie que d'une très petite quantité, elle reviendra, par des vibrations rapides, à son premier état.

On peut conclure de ce qui précède, que la ductilité ne s'oppose à l'élasticité qu'en tant qu'elle permet de déplacer complètement, à l'aide d'un effort médiocre, les particules du corps ductile.

La forme des corps influe d'une manière très importante sur les phénomènes de l'élasticité, et peut transformer les mouvemens infiniment petits des particules du corps en

mouvemens très étendus des différens points de sa masse.

Si l'on prend une lame d'acier parfaitement droite, et qu'on la courbe en demi-cercle, il est évident que toutes les particules de la surface convexe se trouveront placées un peu plus loin les unes des autres qu'avant la flexion, puisque les deux surfaces opposées de la lame avaient la même longueur, et qu'actuellement la demi-circonférence extérieure est nécessairement plus longue que la demi-circonférence intérieure; et par opposition, les molécules de la surface concave seront plus rapprochées les unes des autres qu'elles ne l'étaient primitivement; et si nous supposons que toutes les molécules tendent à reprendre leur situation première, la lame d'acier devra se redresser à l'instant où on l'abandonnera. En conséquence, ses deux extrémités parcourront de grands espaces, en vertu des rapprochemens et des écartemens infiniment petits qui auront lieu entre les particules.

Si l'on suppose qu'un solide sphérique élastique reçoive un choc dans un point de sa surface, sa forme générale sera modifiée de manière que le diamètre répondant au point choqué sera raccourci, et tous les diamètres transversaux alongés; mais aussitôt après le choc, le diamètre perpendiculaire non seulement reprendra sa longueur, mais la dépassera pendant que tous les diamètres transversaux se raccourciront, et ce changement de forme est précisément la cause du mouvement opposé que prendra le corps élastique après le choc.

Si le corps élastique est un simple anneau circulaire, il deviendra elliptique dans un sens, au moment du choc, et immédiatement après, elliptique dans le sens opposé; et dans ce cas les mouvemens de totalité seront beaucoup plus sensibles que dans le cas du solide sphérique, parce que toute la matière se trouve transportée à la circonférence

de la figure. Il en sera à peu près de même pour une sphère élastique creuse.

On peut rendre ce phénomène sensible à la vue et au toucher, en frappant sur le bord d'un grand vase de cristal ou dans l'intérieur d'une cloche de bronze. On voit alors distinctement les mouvemens d'oscillations rapides par lesquelles ces corps circulaires passent avant d'arriver au repos; et si l'on en approche avec précaution un autre corps solide, on entend une multitude de chocs très rapides qui ne peuvent dépendre que des changemens de forme de la cloche.

Les vibrations par lesquelles les corps élastiques arrivent peu à peu à l'état de repos, sont soumises à des lois qui dépendent de la nature et de la forme de ces corps, et que nous étudierons plus tard. Elles se communiquent à l'air qui les environne, et produisent souvent ce que nous appelons des *sons*.

Les corps mous et flexibles, comme les cordes, les fils métalliques, les tissus, les membranes, etc., laissent, dans leur état naturel, trop facilement déplacer leurs molécules pour présenter une élasticité sensible. Mais si l'on remplace la dureté qui leur manque par la tension de leurs différentes parties; si, par exemple, on attache une corde par ses deux extrémités, en exerçant sur elle une traction; si l'on dispose de la même manière une membrane sur un moule solide, ces corps, tout à l'heure si souples, deviendront éminemment élastiques. En effet, la corde et la membrane ont leurs molécules placées le plus près possible les unes des autres, quand l'une est droite et l'autre plane; mais si l'on vient à écarter la corde de sa direction droite, on la force à s'alonger; on écarte de quelque chose ses particules les unes des autres; elles tendent à se rapprocher: dès lors il y a élasticité, et par conséquent vibration. Le même

raisonnement s'applique à la membrane, qui devient concave lorsqu'on la frappe.

Dans tous les cas d'élasticité que nous venons de passer en revue, si la force employée pour déplacer les molécules est trop grande, il en résulte deux genres d'effet : les corps durs sont brisés, les corps mous sont déformés sans retour; quant aux cordes ou aux membranes, elles se rompent. Dans tous les cas, la force employée a fait dépasser aux molécules le point d'où elles sont susceptibles de revenir à leur situation première.

Lorsque la forme d'un corps élastique est changée par une puissance dont l'action persiste, les molécules paraissent s'arranger peu à peu dans leur nouvelle situation, et y contracter un nouveau mode d'équilibre fixe, d'où vient que les ressorts tendus pendant long-temps finissent par perdre leur élasticité.

L'élasticité des corps solides est une propriété dont nous faisons des usages très fréquens. La tendance des ressorts métalliques à reprendre leur forme altérée est une puissance employée en mécanique pour communiquer le mouvement aux horloges, aux montres, et à beaucoup d'autres machines dans lesquelles entrent encore, comme moyens nécessaires, un grand nombre de lames élastiques qui, par leur situation, exercent des pressions constantes. Des arcs métalliques formés de lames d'acier superposées servent à suspendre nos voitures, et, cédant momentanément aux pressions extraordinaires qu'ils éprouvent, adoucissent tous les chocs qui peuvent résulter d'un mouvement rapide sur un sol inégal. Les coussins, les lits sur lesquels nous reposons, présentent une élasticité générale qui dépend de toutes les élasticités particulières des crins, de la laine, ou des plumes qui entrent dans leur composition. Ces tissus animaux ont une forme propre qui est changée

par la pression, et qu'ils tendent incessamment à reprendre jusqu'à ce que, par un long usage, ils se soient feutrés ou attachés les uns aux autres, et qu'il devienne nécessaire de les carder ou de les battre pour les rendre à leur forme première.

Nous devons faire remarquer, en terminant, que l'élasticité dont nous venons de parler est particulière aux corps solides; qu'elle diffère absolument de celle des gaz et de celle des liquides dont nous parlerons plus tard, et qu'enfin il ne faut pas la confondre avec la compressibilité, dont nous allons parler.

DE LA COMPRESSIBILITÉ.

108. La compressibilité est cette propriété des corps solides, en vertu de laquelle ils seraient susceptibles de diminuer de volume sous l'influence d'une action mécanique extérieure.

Il est essentiel de distinguer cette propriété de tous les autres cas dans lesquels les corps solides peuvent changer de volume. On observe en effet que les corps solides diminuent dans toutes les dimensions lorsqu'ils se refroidissent; mais cet effet doit porter le nom de *condensation*: il est le produit de l'action intime de la cohésion, qui l'emporte alors sur la force répulsive du calorique dont on a diminué la quantité. Quant à la compressibilité proprement dite, elle ne pourrait être que l'effet d'une pression mécanique extérieure qui, venant s'ajouter à la force de cohésion des molécules, l'emporterait sur la force répulsive du calorique, et déterminerait un rapprochement.

Pour étudier la compressibilité, il faut d'abord distinguer les corps solides en deux espèces, savoir : les corps éminemment poreux, et les corps qui n'ont point de pores *visibles*.

COMPRESSIBILITÉ DANS LES CORPS POREUX.

109. Dans les corps poreux, comme le liége, il existe des cavités dont le diamètre est assez considérable pour qu'il n'y ait aucune action moléculaire possible entre les particules de leurs parois. Ce sont en quelque sorte de petites vésicules qui peuvent s'aplatir sous la moindre pression, et jusqu'à ce que leurs parois se touchent. Il est constant que ces sortes de corps sont éminemment compressibles, puisqu'il suffit de presser un morceau de liége entre les doigts pour lui faire perdre la moitié de son volume; mais on peut considérer cette diminution de volume comme un rapprochement de beaucoup de petites masses de matières qui précédemment étaient écartées les unes des autres. Il est évident qu'on n'a pas eu affaire, dans cette opération, à l'action répulsive du calorique; le liége comprimé ne s'est point échauffé, on en a tout au plus expulsé l'air atmosphérique qui était contenu dans les pores. Nous dirons donc que les corps très poreux sont susceptibles de diminuer de volume par la pression, sans que la matière propre de ce corps ait réellement éprouvé aucune véritable compression, ce qui n'empêche pas que ces corps ne reviennent à leur volume primitif quand on cesse de les presser, mais seulement par un effet de l'élasticité des parois de leurs cellules.

Quant aux corps solides qui n'ont pas de pores visibles, on peut les distinguer en corps ductiles et en corps élastiques.

COMPRESSIBILITÉ DANS LES CORPS DUCTILES.

110. Une expérience directe tend à prouver la com-

pressibilité des corps ductiles : si l'on prend avec exactitude la température et le poids spécifique d'une rondelle d'or ou d'argent destinée à former une pièce de monnaie, et qu'on appelle *flan*, et si l'on fait subir à cette rondelle un choc de balancier, on trouvera la pièce frappée fortement échauffée : si l'on prend de nouveau son poids spécifique, on le trouvera augmenté. Ces deux circonstances indiquent que les molécules du corps ont été rapprochées et qu'il y a eu compression. Si l'on répète la même action sur le même flan, à chaque coup de balancier il y aura moins de condensation produite et moins de calorique dégagé, jusqu'à ce qu'enfin ces effets deviennent nuls.

On peut conclure de cette expérience intéressante que l'or et l'argent sont compressibles par le choc. Il est cependant possible que, dans les métaux qui ont été fondus, et surtout dans ceux qui ont une texture plus ou moins lamelleuse, il se forme certains pores plus grands que les autres, ou de petites cellules qui disparaissent sous un choc violent, en sorte que la compressibilité des métaux ductiles reste douteuse. Il est certain que si la compressibilité des métaux ductiles est réelle, elle exige du moins une énorme puissance. On peut en juger par celle avec laquelle ces métaux se dilatent quand on les pénètre de calorique; ils sont alors capables de surmonter les plus grandes résistances physiques que nous puissions employer pour les contenir. Et l'on conçoit que la force qui serait nécessaire pour réduire un corps solide, à quinze degrés de température, au volume qu'il occuperait à zéro de température, doit être au moins égale à la force avec laquelle ce corps se dilate quand il s'échauffe de zéro à quinze degrés.

COMPRESSIBILITÉ DANS LES CORPS ÉLASTIQUES.

111. La compressibilité semble on ne peut pas plus facile à démontrer dans les corps qui jouissent d'une élasticité parfaite unie à une grande densité. Il paraît en effet que, lorsqu'on laisse tomber une bille élastique sur un plan de marbre, les points de cette bille qui viennent à toucher le plan sont en quelque sorte refoulés dans l'intérieur de la masse du corps, pour en ressortir ensuite en produisant le mouvement réfléchi. On apporte, pour preuve de ce genre d'effet, que si l'on a couvert le plan d'une légère couche d'huile, on y reconnaît, après le choc, non pas seulement la trace d'un seul point de contact, mais bien une surface circulaire assez étendue, qui semble indiquer que la sphère s'est aplatie dans le moment du choc. Cependant, en examinant avec attention les circonstances de cette expérience, on trouve d'abord que dans une bille de cristal, par exemple, le degré de déplacement des particules, qui serait nécessaire pour produire une semblable surface plane, devrait nécessairement amener la rupture du corps. On observe encore que dans certains chocs de ce genre il se forme des fractures intérieures coniques, dont le sommet très aigu est placé à la surface; ce qui favorisent l'idée que le contact n'a eu lieu que par un point : et enfin, si l'on observe les effets du choc sur un cercle élastique d'une grande étendue, il devient évident que toutes les particules du corps sont réciproquement déplacées; que l'un de ses diamètres s'accroît quand l'autre diminue; mais on n'observe pas la formation d'une grande ligne droite ou même concave à l'endroit du choc, comme cela devrait avoir lieu dans la théorie supposée. Il devient donc probable que dans le choc les corps durs élastiques changent généra-

lement de forme, éprouvent un léger déplacement simultané de toutes leurs particules, sans que l'on puisse en conclure qu'il y ait eu compression, c'est-à-dire diminution effective de l'intervalle qui sépare les molécules les unes des autres.

Il reste à expliquer la trace d'une surface circulaire étendue dans le lieu du choc. Mais il faut observer, 1° que cette tache n'est rendue sensible que par une petite couche de liquide, dont les particules frappées dans le point de contact doivent être projetées circulairement, de manière à laisser un certain espace nettoyé de cet enduit; 2° que les corps qui sont plongés dans l'air sont immédiatement recouverts d'une couche adhérente de ce fluide élastique, qui doit se comporter comme la couche de l'enduit liquide, et produire des effets encore plus marqués, en raison de son élasticité et de la forte compression qui doit avoir lieu dans le point même du contact.

La compression paraît encore plus probable dans la flexion d'une lame élastique, puisque la surface concave présente nécessairement moins d'étendue qu'avant la flexion. Mais on peut objecter que la couche moléculaire qui forme cette face interne, tout en prenant moins de longueur, peut augmenter de largeur ou d'épaisseur, et que les molécules peuvent être ainsi réellement déplacées ou éloignées de leur situation d'équilibre fixe, sans avoir éprouvé un véritable rapprochement réciproque.

La quantité dont un corps élastique peut augmenter de volume par des tractions, ou diminuer par des pressions, peut être déterminée à l'aide du calcul, en partant de la quantité dont un prisme s'alonge sous une traction donnée. Nous donnerons les résultats à l'article *Extensibilité* : nous disons ici par avance qu'il y a encore beaucoup d'incertitude à cet égard, et qu'en tous cas les puissances néces-

saires pour augmenter ou diminuer sensiblement le volume d'un corps élastique sont énormes. Ainsi en admettant l'exactitude des données, il en résulterait, pour le fer par exemple, qu'un cube de fer d'un décimètre diminuerait de $\frac{1}{13333}$ s'il était comprimé par une force d'un kilogr. par millimètre carré, ce qui représente une pression totale de 60,000 kilogr., ou une pression de 100 atmosphères; le verre diminuerait de $\frac{1}{6060}$, le cuivre jaune de $\frac{1}{4183}$, le plomb de $\frac{1}{337}$, etc.

Si l'on compare ce que nous avons dit de l'élasticité et de la compressibilité, on verra que ces deux propriétés ne sont pas aussi intimement liées l'une à l'autre qu'on serait naturellement porté à le croire et qu'on le dit communément. Cette confusion peut bien provenir en partie de certains exemples saillans d'élasticité, par suite de compressions qui se remarquent dans des corps volumineux. C'est ainsi qu'un ballon gonflé d'air s'aplatit considérablement par le choc, et, reprenant bientôt sa forme première, s'élance de nouveau avec toute la force que lui communique l'élasticité de l'air qu'il renferme. Mais la comparaison est inexacte; car nous démontrerons par la suite que les fluides élastiques diminuent de volumes et augmentent de tension en raison directe des pressions qu'ils éprouvent, et jouissent par conséquent d'un mode d'élasticité qui leur est tout particulier.

DE LA FLEXIBILITÉ.

112. On donne le nom de *flexibilité* à cette propriété des corps solides en vertu de laquelle ils peuvent être pliés sans se rompre, soit qu'ils conservent cette forme, ce qui arrive aux corps ductiles; soit qu'ils reprennent leur forme première, ce qui arrive aux corps élastiques.

Si l'on observe ce qui se passe dans la flexion d'une tige

d'un métal ductile, on verra que les molécules situées du côté où la flexion produit un angle saillant, s'écartent en glissant les unes sur les autres, tandis que celles qui sont placées dans l'angle rentrant s'accumulent et forment une saillie apparente. Il est permis de supposer que quelque chose de semblable arrive dans la flexion du corps élastique.

L'ordre de flexibilité dans les métaux doit être à peu près celui de leur ductilité. Mais la facilité avec laquelle un corps peut être plié dépend principalement de l'épaisseur de la masse sur laquelle on agit. En effet, puisqu'il est question d'étendre les molécules d'une face et d'accumuler celles de l'autre, on a affaire à deux résistances qui seront d'autant plus énergiques qu'elles agiront au bout d'un plus long levier; et la longueur de ce levier est exprimée par l'épaisseur même du corps qu'il est question de plier. On voit par là pourquoi il y a tant d'avantage à faire usage, dans les constructions, de pièces de bois ou de fer qui présentent une grande épaisseur verticale.

Lorsqu'au contraire on a besoin d'une flexibilité prononcée, comme dans la plupart des ressorts, on dispose les lames d'acier de manière à les courber sur leur plat.

On peut dire que presque tous les corps de la nature sont flexibles quand leurs dimensions sont convenables, c'est-à-dire lorsqu'ils présentent une grande longueur sur une très petite épaisseur. Ainsi le verre, qui est si dur et si fragile, peut être réduit en fils si minces qu'on puisse le dévider et le pelotonner comme un fil de soie. Beaucoup de minéraux offrent des exemples d'une flexibilité remarquable. Mais ce sont particulièrement ceux dont le tissu offre des filets déliés, comme l'amiante, ou des lames minces, comme le mica.

Les plus flexibles de tous les corps de la nature sont

certainement les tissus organiques, comme le chanvre, le coton, la laine, la soie.

DE L'EXTENSIBILITÉ.

113. On donne le nom d'*extensibilité* à cette propriété de beaucoup de corps solides, de se laisser alonger dans un sens déterminé par deux tractions opposées. Elle peut avoir lieu de plusieurs manières différentes.

Un fil de métal quelconque peut s'alonger par l'action d'une force qui le tire suivant sa longueur : si la force employée n'a pas été trop grande, lorsqu'elle cesse le fil reprend sa longueur première ; il se développe donc dans ce cas une force élastique dont les effets sont fort importans à considérer.

En premier lieu S'Gravesende a prouvé que l'alongement était proportionnel à la force, tant que celle-ci n'était pas assez grande pour étirer le fil.

Le second fait remarquable est que le fil alongé ne diminue pas de volume, mais augmente au contraire. Ainsi M. Poisson a trouvé, par l'analyse, que si un fil s'alonge d'une quantité représentée par a pour l'unité de longueur, son diamètre diminuera de $\frac{a}{4}$; en sorte que le volume avant l'alongement étant V, il devient V $(1+\frac{a}{2})$, c'est-à-dire plus grand. Ainsi un fil alongé diminue de diamètre, mais moins qu'il ne devrait diminuer pour conserver le même volume.

M. Cagnard de la Tour a confirmé ce résultat par une expérience ingénieuse. Ayant fixé un fil dans un tube étroit plein d'eau, il a vu en tendant ce fil que l'eau ne baissait pas dans le tube en raison du volume émergé du fil, mais environ moitié moins.

On n'a pas encore déterminé très exactement les quantités précises dont tous les corps élastiques s'alongent pour une traction constante; si on les connaissait on aurait le coefficient de dilatation de ces corps, c'est-à-dire la fraction de leur volume, dont ils augmenteraient sous une traction constante dans tous les sens; car on trouve par le calcul

$E=\frac{2F}{5d}$, c'est-à-dire que E égal deux fois la force de tension divisé par 5 fois l'alongement pour l'unité de longueur.

On a trouvé jusqu'à présent pour le fer $E=8000$, pour le verre $E=3636$, pour le cuivre jaune $E=2510$, et par le plomb $E=202$.

Comme ces calculs s'appliquent aux effets des forces qui compriment aussi bien qu'aux effets des forces qui dilatent, on peut en déduire les changemens de volume des corps solides par la compression, au moyen des formules approximatives $D=\frac{1}{E}, \frac{F}{5}$ et $D^1=\frac{1}{E}, \frac{2F}{5}$, D étant la dilatation cubique, et D^1 la dilatation en longueur. C'est ainsi qu'ont été trouvés les résultats donnés (110).

La force élastique qui se développe dans les fils tendus devient une force d'oscillation quand on les tord, comme nous le verrons en parlant de la balance de Coulomb.

Si l'on agit sur les mêmes métaux par une traction plus forte, ou si l'on emploie des métaux plus ductiles, comme l'or ou l'argent, les fils s'alongent encore; mais ils ne reviennent plus à leur longueur première. Aussi ces métaux très ductiles ne peuvent-ils servir à faire des cordes sonores. Le déplacement des molécules est ici complet, et elles prennent une nouvelle situation d'équilibre fixe, comme dans les autres phénomènes de ductilité.

Les corps très poreux, comme les peaux des animaux, les cordes à boyau, les cordes de chanvre, etc., s'alongent en diminuant de diamètre ou d'épaisseur d'une manière très sensible. Dans ce cas, il est évident que les grands pores que ces substances contiennent s'alongent eux-mêmes et se rétrécissent pendant l'effet de la traction. Et si leurs parois sont élastiques, comme dans les peaux sèches, le corps alongé peut revenir sur lui-même. Mais si ces parois sont flexibles et non élastiques, comme dans la peau mouillée, le corps conserve les dimensions que lui a données l'effort de traction.

Le caoutchouc offre un exemple d'extensibilité élastique: il s'alonge considérablement et revient presque complètement à son premier état. Ce qu'il y a de remarquable, c'est que si on le plonge dans l'eau froide pendant qu'il est alongé, il ne revient plus sur lui-même et conserve son état d'extension; mais si on l'échauffe dans la main, après l'avoir retiré de l'eau et séché, il reprend peu à peu toute son élasticité et sa forme première. Il paraît que la condensation produite par le froid détermine entre les molécules de nouvelles adhérences, qui maintiennent l'état d'extension jusqu'à ce qu'une nouvelle quantité de calorique vienne détruire ces adhérences. Le caoutchouc est jusqu'ici la seule substance qui ait présenté ce phénomène particulier, sans doute parce qu'il jouit à la fois d'une grande extensibilité et d'une force élastique très peu énergique.

DE LA DILATABILITÉ.

114. On entend par *dilatabilité*, la propriété dont jouissent les corps solides d'augmenter de volume dans tous les sens lorsque leur température s'élève. A cette propriété cor-

respond la faculté réciproque de se contracter ou de diminuer de volume lorsque la température s'abaisse.

Nous avons déjà dit qu'on attribuait non seulement les divers états des corps, mais les changemens de volume qui surviennent à un corps, sans le faire changer d'état, à la force répulsive qui anime les particules du calorique.

Tous les corps solides, sans exception, sont susceptibles de dilatation et de contraction dans les cas indiqués : et sans avoir recours à des expériences de cabinet, une foule de circonstances vulgaires en apportent la preuve. La grille du Carrousel était primitivement formée de barres de fer solidement liées entre elles depuis la porte du milieu jusqu'aux bâtimens latéraux. Ces deux barres métalliques, d'une grande longueur, se raccourcissaient en hiver et s'alongeaient en été, de telle façon que dans la première saison la porte restait béante, tandis que dans la seconde les deux vantaux se croisaient, et que dans aucun cas la porte ne se fermait convenablement. On a été obligé d'interrompre cette longue continuité, et de permettre aux parties divisées de se mouvoir dans l'intérieur des petites colonnes de pierre qui partagent la longueur de la grille.

Les longues conduites de tuyaux de fonte présentent des phénomènes semblables, et, pour en prévenir les inconvéniens, on dispose d'espace en espace des tuyaux qui, sans laisser échapper l'eau, peuvent rentrer l'un dans l'autre ou ressortir au besoin.

La force avec laquelle les corps solides augmentent ou diminuent de volume par les changemens de température est énorme, et n'a même d'autres limites connues que la cohésion et la solidité de ces corps. Si dans la construction du fourneau le plus solide on fait en sorte que la grille du foyer touche par ses extrémités les parois du fourneau, à

la première impression de la chaleur la grille s'alongera et la maçonnerie sera écartée.

Si l'on attache à deux murailles une barre de fer pendant qu'elle est chaude et qu'on la laisse refroidir, les murailles seront rapprochées, quelle que soit leur masse. Si l'on pose sur un corps cylindrique un cercle de fer encore chaud et qui s'y place librement, le cercle, en se refroidissant, étreindra le cylindre avec une grande force, et pourra même se rompre si la résistance du corps cylindrique est plus considérable que la force de cohésion du cercle de fer. C'est ainsi que sont disposées les roues de voitures, et c'est ce qui leur donne une si grande solidité.

Dans la construction des longs tuyaux de conduite, on a remarqué, avant l'usage des compensateurs que nous avons décrits, que pendant l'hiver les boulons qui unissent les différentes parties des tuyaux se rompaient par la rétraction de ces tuyaux.

On ne sera pas surpris de la grande puissance de ces petits mouvemens, si l'on considère qu'ils sont le résultat d'actions intimes ou moléculaires.

Tous les corps solides diffèrent entre eux par la quantité dont ils sont susceptibles de se dilater ou de se contracter sous l'influence des mêmes températures. Les métaux sont les plus dilatables de tous; viennent ensuite le verre, les pierres, le bois, etc.

Nous n'avons voulu donner ici qu'une indication générale de cette propriété importante des corps solides. Elle est regardée comme un effet des propriétés du calorique, et nous devrons l'étudier en détail en traitant de ce fluide impondérable.

CHAPITRE III.

APPLICATION DES LOIS DE LA MÉCANIQUE A L'ÉQUILIBRE ET AU MOUVEMENT DES CORPS SOLIDES.

115. *Application des lois de la composition des forces aux corps solides.* Nous avons donné (35 et suiv.) les lois de la composition des forces en les supposant appliquées soit à un seul point matériel, soit à deux ou plusieurs points matériels invariablement liés entre eux. Pour appliquer maintenant ces lois aux conditions d'équilibre et de mouvement des corps solides, il est bon de remarquer, 1° que les corps solides peuvent être considérés comme une réunion d'un très grand nombre de points matériels invariablement liés entre eux; nous disons invariablement, parce que nous supposerons d'abord que les forces employées ne sont pas capables de changer la forme du corps solide ou de le rompre, nous réservant d'examiner ensuite les changemens de forme et les ruptures qui peuvent survenir aux corps solides par l'application de certaines forces; 2° qu'il suffit d'agir sur un petit nombre de points, ou même sur un seul point d'un corps solide, pour mettre toute sa masse en mouvement; mais que les mouvemens des divers points de cette masse sont souvent très différens les uns des autres, quoique produits par les mêmes puissances. C'est ainsi que, dans un corps qui tourne autour d'un axe, les vitesses de toutes les molécules sont proportionnelles à leur distance à l'axe. Nous devons distinguer le cas de l'application des forces à un corps solide absolument libre, des

cas dans lesquels le corps solide est fixé par un ou plusieurs points de son étendue.

CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES FORCES AGISSANT SUR UN CORPS LIBRE.

116. Les lois abstraites que nous avons établies pour des points matériels liés entre eux s'appliquent ici rigoureusement. Il suffit donc d'énoncer les propositions suivantes: *Un corps libre sollicité par une seule force ne peut être en équilibre qu'autant qu'on oppose une force égale agissant sur le même point du corps, ou sur tout autre point dans la même ligne droite.*

Un nombre quelconque de forces agissant sur le même point d'un corps solide, ce corps sera en équilibre, si leur résultante commune égale zéro.

Un corps libre sollicité par deux forces appliquées à des points différens ne pourra être en équilibre que dans le cas où ces deux forces seront directement opposées; comme dans la *fig.* 17, où le corps AB est sollicité par les deux forces AC et BD.

Dans le cas où ces puissances seraient parallèles ou obliques, l'équilibre sera produit comme nous l'avons dit (42 et suiv.)

Un corps libre sollicité par un nombre quelconque de forces parallèles, ne peut être en équilibre que dans le cas où toutes ces forces se réduiraient à deux forces égales et directement opposées. Lorsque ces forces ont une seule résultante, on obtient l'équilibre en lui opposant directement une force égale.

Lorsqu'un corps libre est sollicité par un nombre indéterminé de forces dans toutes les directions appliquées à un nombre déterminé de points, le problème se résout par les lois indiquées (46).

DU CENTRE DE GRAVITÉ.

117. On rencontre dans la nature un exemple frappant d'une des circonstances que nous venons d'indiquer. En effet tous les corps pesans sont sollicités par la pesanteur, comme si chaque point matériel qui les compose était animé d'une force; et toutes ces forces sont sensiblement parallèles d'après ce que nous avons dit (63). Nous avons dit aussi (44) que des forces parallèles présentaient une résultante commune passant par un point déterminé, et que ce point, que nous avons nommé *centre des forces parallèles*, était invariable, quoique l'on fît changer la direction des forces, et pourvu que l'on conservât leur parallélisme.

On nomme *centre de gravité* d'un corps le point par lequel passe la résultante des puissances de pesanteur qui animent chacune de ses parties; et ce centre de gravité doit rester le même dans quelque sens que l'on tourne le corps, puisque ces mouvemens changent la direction des forces parallèles par rapport au corps, sans détruire leur parallélisme.

Si nous supposons un corps ellipsoïde AB (*fig.* 18) situé horizontalement, toutes ses particules seront sollicitées par des forces égales et parallèles, et nous pouvons prendre pour exemple de ces forces celles des deux points extrêmes, et les représenter par les lignes AD et BE; elles auront une résultante commune et dans le même sens, égale à leur somme : cette résultante, passant par le point C, sera représentée par CF.

Nous disons que si le même corps change de situation et se trouve placé verticalement, comme dans la *fig.* 19, la résultante *cf* passera par un point *c*, qui sera le même dans

l'intérieur du corps que le point G de la *fig.* 18. Et la même chose arriverait, si le corps était situé obliquement comme dans la *fig.* 20; d'où il résulte qu'il y a dans l'intérieur de tout corps solide un point unique qui est le centre des forces parallèles de la pesanteur, quelle que soit la situation du corps, et qu'on nomme *centre de gravité.*

La force de pesanteur agissant sur un corps solide quelconque peut donc toujours être représentée par une résultante unique qui passe par son centre de gravité, et dont la direction est verticale.

Il résulte de ce que nous venons de dire que, pour faire équilibre à la pesanteur d'un corps, il faut lui opposer une force égale qui passe par le centre de gravité, et dont la direction soit verticale. Il y a deux manières de produire cet effet : on peut suspendre un corps par un de ses points, ou le faire reposer sur un plan solide.

118. La suspension d'un corps par un de ses points fournit un moyen élégant de déterminer son centre de gravité. Soit, par exemple (*fig.* 21), le triangle A B C considéré comme un plan pesant, et supposons qu'on le suspende par un fil attaché à l'angle A : ce triangle prendra une certaine situation d'équilibre; et comme cet équilibre n'est possible que dans le cas où la résultante commune de la pesanteur se trouve dans la même direction que la force qu'on y oppose, il est évident que le centre de gravité du triangle se trouvera dans un point quelconque de la ligne AD. Si l'on trace cette ligne sur le triangle, et qu'on le suspende ensuite de nouveau par l'angle C, les mêmes circonstances se répétant, on aura une nouvelle ligne C F, sur laquelle devra aussi se trouver le centre de gravité du triangle; d'où il suit que ce centre de gravité sera nécessairement placé à l'intersection des deux lignes, c'est-à-dire au point O. Il suffit donc, pour trouver le centre de gravité d'un plan,

de le suspendre successivement par deux points différens, et de chercher le point où les deux directions des fils de suspension se rencontrent.

119. Si un corps pesant repose sur un plan solide, ce plan opposera à la résultante commune des forces de la pesanteur une résistance absolue dépendante de la solidité du plan. Mais comme cette solidité appartient indifféremment à tous les points de sa surface, il en résulte qu'il y aura équilibre toutes les fois que la direction de la verticale, passant par le centre de gravité, tombera sur un point quelconque du plan sur lequel repose le corps. Soit (*fig.* 22), par exemple, le prisme droit A B D E reposant sur sa base, il y aura dans son intérieur un point C qui sera le centre de gravité; en abaissant de ce point la verticale C O, elle tombera sur le point O, situé au milieu de la base du prisme, et ce point offrira une résistance verticale qui détruira l'effet de la pesanteur; en sorte que le prisme sera en équilibre.

Soit un autre prisme oblique *a b d e* : il aura aussi son centre de gravité *c*, dont la verticale tombera sur le point *o*, qui ne sera plus dans le milieu de la base, mais qui sera compris dans sa surface, il y aura encore équilibre entre la force de la pesanteur et la résistance du plan.

Si l'on fait attention aux deux circonstances d'équilibre que nous venons de rapporter, on verra que la résistance du plan aux points O et *o* peut très bien se transmettre jusqu'au centre de gravité du corps par la continuité de la matière solide du prisme, et que d'ailleurs les centres de gravité C et *c* ne pourraient pas descendre suivant les verticales C O et *c o*, sans comprimer les particules inférieures du prisme et changer sa forme; ce à quoi la cohésion du prisme s'oppose. Mais si nous supposons un autre prisme *a' b' d' e'* plus oblique que le précédent, la verticale

abaissée de son centre de gravité c' tombera dans le point o', qui ne sera plus compris dans la base du prisme. Ce point offrira bien la même résistance que tous les autres points du plan; mais il n'y aura plus aucun moyen de transmission de cette résistance au centre de gravité, qui dès lors pourra descendre, non pas librement suivant la ligne verticale, mais en percourant l'arc de cercle $c'c''$. En conséquence, dans cette nouvelle situation, il ne pourra plus y avoir équilibre entre la résistance du plan et la résultante des forces de la pesanteur du corps, et le prisme tombera jusqu'à ce qu'il rencontre le plan résistant par une de ses faces latérales.

Nous avons exprimé jusqu'à présent, dans les termes les plus simples, l'équilibre qui peut s'établir entre les résistances d'un plan et les forces de la pesanteur. Nous avons supposé que toute la résistance agissait aux points O, o, o'; il n'en est pas ainsi : l'action de la pesanteur agit en effet sur toute la surface par laquelle le corps repose sur un plan, et chacun des points de ce plan oppose une résistance partielle égale à la pression qu'il supporte; mais on peut considérer les résistances aux points O, o, o', comme la résultante des résistances opposées à la résultante des forces de pesanteur. Cette explication était nécessaire pour concevoir comment un corps peut reposer en équilibre sur un plan, quoique la verticale descendant du centre de gravité tombe sur un point par lequel le corps ne touche point au plan résistant, et comment il est même possible que le centre de gravité d'un système de corps se trouve placé hors de la masse matérielle des uns ou des autres.

Afin d'éclaircir ces idées, nous supposerons (*fig.* 23) deux prismes obliques A B D E, a b D E, appuyés l'un contre l'autre par l'arête commune D E. Chacun d'eux

aura son centre de gravité particulier C et *c*, et ces centres seront placés de manière que leurs verticales C O et *c o* tomberaient hors de leurs bases, en sorte qu'aucun des deux ne pourrait rester en équilibre. Mais si, comme nous l'avons supposé, ils sont appuyés l'un contre l'autre, les deux résultantes C O et *c o* auront une résultante commune D K, dans la direction de laquelle se trouvera le centre de gravité du système ou de la réunion des deux prismes. Cette résultante tombera sur le plan résistant dans un point K, qui ne sera point compris dans l'une des bases des prismes, et pourtant le système reposera en équilibre sur le plan; car cette résultante D K est fictive, les véritables résistances ont lieu dans les deux surfaces des bases des prismes; elles se transmettent à chacun de leurs centres de gravité, et le centre de gravité commun ne saurait descendre sans comprimer la substance des prismes et en changer la forme, à moins que les bases des prismes ne viennent à glisser sur le plan qui le supporte; ce qui peut arriver, puisque les pressions et les résistances sont obliques à la direction de ce plan.

On concevra, d'après ces explications, que tout corps solide reposant sur trois points est en équilibre, lorsque la ligne verticale descendant de son centre de gravité tombe dans l'intérieur du triangle que l'on peut former avec ces trois points; et plus généralement, qu'un corps solide, reposant sur un nombre quelconque de points, est en équilibre lorsque *la ligne verticale descendant de son centre de gravité tombe dans l'intérieur du polygone, que l'on peut former en réunissant par des lignes droites les points extrêmes sur lesquels repose le corps.*

On nomme *bases de sustentation* les surfaces dont nous venons de parler.

120. Les corps solides d'une figure régulière ou symé-

trique présentent une circonstance particulière, savoir : que leur centre de gravité est situé dans le centre de figure. Il est facile de concevoir que la chose doit être ainsi; car, si l'on fait passer un plan par le centre de figure d'un pareil corps dans une direction quelconque, il se trouvera toujours, des deux côtés de ce plan, un nombre parfaitement égal de particules matérielles situées à des distances respectives de ce plan parfaitement égales. Et par conséquent la somme des forces de la pesanteur d'un côté égalera la somme des forces de la pesanteur de l'autre; ce qui prouve que le centre de gravité sera dans ce plan. Mais comme il en serait de même pour tout autre plan passant par le centre de figure, il en résulte que le centre de gravité est dans ce point même.

121. Jusqu'ici nous avons supposé, en parlant du centre de gravité des corps, que la matière de ces corps était *homogène*, c'est-à-dire, qu'elle présentait partout une égale densité ou le même nombre de particules sous le même volume; mais on conçoit qu'une masse matérielle dont on cherche le centre de gravité peut se trouver *hétérogène*, ou formée de substances diverses ayant des poids spécifiques différens. Dans ce cas, la situation du centre de gravité sera modifiée par ces différences de pesanteur. Si, par exemple, nous supposons (*fig.* 24) un plateau circulaire formé dans tous ses points de la même substance, comme cette figure est régulière, le centre de gravité se trouvera précisément au point C, qui est le centre de figure du cercle, ou le centre proprement dit. Mais si la moitié A de ce cercle était de bois, et la moitié B de plomb, le centre de gravité ne serait plus au centre de figure; il serait quelque part en un point C′, compris dans la moitié la plus pesante.

122. Un système de corps liés entre eux d'une manière

invariable, présente, suivant la situation respective de ces corps, un centre de gravité qui peut être placé, comme nous l'avons vu, soit dans l'intérieur d'un des corps, soit dans l'espace qui les sépare. Soient, par exemple (*fig.* 25), les corps A et B unis par la ligne A B : si les deux masses sont égales, leur centre de gravité commun se trouvera dans le milieu de leur intervalle, et par conséquent au point C; mais s'il arrivait que le corps B, sans changer de poids, fût transporté au point B′, et toujours lié au corps A, le centre de gravité ne se trouverait plus en C, mais en C′, qui serait alors le milieu du nouvel intervalle séparant les corps; ce qui fait concevoir que, dans un système de parties pesantes et mobiles les unes sur les autres, le centre de gravité commun peut varier à chaque instant suivant les nouveaux rapports que ces parties peuvent prendre entre elles.

123. Il peut arriver qu'un corps soit en équilibre quoiqu'il ne pose sur un plan solide que par un seul de ses points, et l'on conçoit en effet que l'équilibre aura effectivement lieu, si ce point se trouve précisément dans la verticale qui descend du centre de gravité. Cette circonstance arrive pour une sphère parfaite, dans toutes les positions où l'on peut la placer, c'est ce qu'on nomme *équilibre indifférent*; mais il n'en est pas de même pour tout autre corps. Et, par exemple, dans le cas d'un ellipsoïde, ou d'un corps ayant la forme d'un œuf, il n'y a qu'un certain nombre de situations dans lesquelles la verticale du centre de gravité passe par le point de contact avec le plan. Si l'ellipsoïde est placé debout sur une de ses pointes, le centre de gravité se trouvera placé le plus haut possible; l'équilibre pourra exister, mais sera très difficile à maintenir, attendu que le centre de gravité peut descendre par le plus petit changement dans la situation du corps. C'est pourquoi il est impossible de faire tenir un œuf sur sa pointe; et c'est ce qu'on appelle

équilibre instantané ou *instable*. Si l'ellipsoïde est placé horizontalement, le centre de gravité se trouvera au contraire le plus près possible du point de contact; il lui sera impossible de descendre davantage, et tous les mouvemens qu'on pourrait imprimer au corps auraient pour effet d'élever le centre de gravité, qui tendrait aussitôt à redescendre ou à revenir à sa position première; d'où il résulte que ce second genre d'équilibre est *permanent* ou stable.

On dit en général qu'il y a deux cas d'équilibre, l'un dans lequel le centre de gravité est le plus haut, et qu'on appelle *instable*, et l'autre dans lequel il est le plus bas, et qu'on appelle *stable*.

On conclut de ce principe qu'en général un corps a d'autant plus de stabilité, ou est d'autant plus difficile à renverser, que son centre de gravité est situé plus bas.

123. La théorie du centre de gravité est susceptible d'un grand nombre d'applications aux besoins de la vie, aux arts, et surtout à la mécanique de l'homme.

Le but principal de l'architecture, c'est-à-dire la solidité des constructions, résulte des dispositions dans lesquelles on a convenablement distribué les masses superposées qui constituent nos édifices. L'élégance et le goût, qui sont plus souvent qu'on ne pense l'expression naturelle du beau et du bon, consistent, en architecture, à placer les uns sur les autres des ordres toujours plus légers, et à donner à l'édifice une base dont la largeur et la force paraissent propres à supporter l'élévation totale. Une simple colonne n'aura de grace qu'autant que sa base sera plus large que son sommet et sera proportionnée à sa hauteur. Les tours de Pise et de Bologne font exception à cette règle générale, et semblent prêtes à s'écrouler sur le spectateur qui les considère; mais elles sont cependant disposées de

manière que la verticale du centre de gravité tombe encore sur la base de sustentation.

Un des cas les plus communs, et qui intéressent plus particulièrement notre sûreté individuelle, se trouve dans la considération de la situation relative du centre de gravité, par rapport à la base de sustentation, dans les diverses voitures dont nous avons coutume de faire usage.

Dans la voiture à deux roues, ou ce que l'on nomme cabriolet, la base de sustentation est triangulaire; elle est renfermée par des lignes qui joindraient les deux points de contact des roues avec le sol, et ces deux points eux-mêmes avec les pieds du cheval attelé à la voiture. En faisant abstraction des chances de chute du cheval lui-même, on voit que la base de sustentation est large; et d'un autre côté, le poids dont le cabriolet est chargé repose principalement sur le siége, qui se trouve situé un peu au dessus du niveau de l'essieu : pour qu'un semblable appareil soit renversé, il faut qu'une des deux roues soit élevée au moins de la longueur de son rayon. Ce genre de voiture aurait une grande stabilité sans une circonstance particulière, savoir : que dans le cas où l'appareil se meut suivant une courbe resserrée, le centre de gravité prend une force centrifuge qui concourt au renversement de la voiture; aussi voit-on fréquemment les cabriolets verser en tournant rapidement pour changer de direction, et pour peu que la roue interne soit soulevée par le moindre obstacle.

On diminue et on peut détruire presque complètement la stabilité de ce genre de voiture en rendant leur construction légère, et en élevant beaucoup la situation du siége.

Les voitures à quatre roues offrent une grande base de sustentation, représentée par le rectangle qui réunit les quatre points de contact de leurs roues avec le sol. Leur

stabilité diminue considérablement lorsque leur train de devant tourne à angle droit, car alors le rectangle se trouve réduit à un triangle. Les voitures à trois roues, introduites sous le nom de tricycles, ont le grand inconvénient d'offrir constamment cette base de sustentation triangulaire.

Un point très important de la construction des voitures à quatre roues destinées à des voyages plus ou moins longs, c'est la situation de leur centre de gravité, situation qui peut être changée à volonté par la disposition des poids accidentels ou des fardeaux dont on les charge. Supposant d'abord que la voiture vide ait son centre de gravité à peu près au niveau des banquettes destinées aux voyageurs; si tout l'intérieur se trouve occupé, le centre de gravité commun ne sera pas sensiblement plus élevé que pour la voiture vide, car nous verrons bientôt que le centre de gravité de l'homme est lui-même situé dans le bassin: mais si nous supposons que l'on place sur l'impériale de cette voiture des fardeaux représentant neuf cents kilogrammes, en admettant que six voyageurs forment un poids de quatre cent cinquante kilogrammes, le centre de gravité commun de ces deux masses se trouvera placé vers le tiers supérieur de la hauteur de la caisse de cette voiture, et conséquemment les conditions de stabilité seront diminuées dans une très grande proportion.

Les dangers sont encore bien plus grands si les voyageurs eux-mêmes sont placés sur l'impériale de cette voiture.

Le danger de placer des masses pesantes dans les points élevés d'un semblable appareil mobile ne dépend pas seulement de l'élévation absolue du centre de gravité, mais des oscillations produites par les inégalités du sol; les corps pesans situés dans les points élevés acquièrent des

vitesses considérables qui concourent à faire dépasser au système la situation nécessaire de son centre de gravité.

C'est donc avec beaucoup de raison et d'avantage pour la sécurité des voyageurs que le gouvernement, après avoir consulté l'Académie des Sciences, a imposé des règles de construction et de chargement aux voitures publiques.

125. Le corps de l'homme, dans ses diverses attitudes et dans ses différens mouvemens, doit nécessairement conserver la condition indispensable pour prévenir une chute. Cette condition se compose d'un très grand nombre d'élémens, attendu que, 1° le corps de l'homme est formé de substances hétérogènes et diversement pesantes : la tête est, par exemple, spécifiquement plus lourde qu'aucune autre partie du corps; 2° toutes les parties du corps sont mobiles les unes sur les autres, ce qui peut faire changer à tout moment la situation du centre de gravité; 3° la base de sustentation elle-même est susceptible d'une grande variété d'étendue et de situation, soit par les positions diverses que peuvent prendre les pieds, soit lorsque l'homme est assis. Il est cependant possible d'établir un certain nombre de considérations générales qui servent de points de départ pour concevoir tous les cas particuliers.

Le corps de l'homme étant dans une situation droite, les jambes rapprochées l'une de l'autre et les bras appliqués sur les côtés du tronc, le centre de gravité de tout le corps répond dans la cavité du bassin, au devant de la dernière vertèbre lombaire. Si l'homme, en cet état, repose sur la plante de ses pieds, la base de sustentation est circonscrite par la ligne qui entoure les deux pieds réunis; elle a par conséquent à peu près dix pouces d'avant en arrière, et sept pouces d'un côté à l'autre. L'équilibre peut avoir lieu, ou la station sur les pieds peut se maintenir, pourvu que la verticale abaissée du centre de gra-

vité tombe dans l'intérieur de cette base étroite; mais on conçoit que le moindre effort doit suffire pour renverser un homme dans cette situation. Si les deux pieds sont placés l'un devant l'autre, et sur la même ligne, la base de sustentation est doublée dans un sens, mais diminuée de moitié dans l'autre, et la station est encore moins stable que dans le cas précédent. Si un seul pied pose sur le sol, la station devient très difficile à maintenir. Dans toutes les suppositions que nous venons de faire, l'homme se maintiendrait difficilement debout, et ne saurait résister aux plus légers efforts tendans à le renverser; mais la faculté d'écarter dans différens sens les deux pieds l'un de l'autre accroît considérablement sa stabilité : en effet, si les deux pieds sont écartés parallèlement l'un de l'autre, la base de sustentation est représentée d'avant en arrière par une longueur de dix pouces, et transversalement par l'écartement des deux pieds, qui peut aller jusqu'à trente pouces. C'est dans cet état que la stabilité est à son *maximum*. Cependant, suivant le sens dans lequel se fait l'effort qui tend à renverser l'homme, il peut agrandir la base de sustentation dans une direction ou dans l'autre. C'est ainsi qu'en portant un pied en arrière, il résiste efficacement aux puissances qui tendent à le pousser d'avant en arrière.

Si, dans la supposition de la station droite et sur les pieds réunis, une des parties du corps vient à se mouvoir, le centre de gravité sera déplacé, et la verticale cessera bientôt de tomber dans la base de sustentation. Par exemple, si la tête et le tronc se fléchissent en avant sur le bassin, le centre de gravité devenant plus antérieur, sa verticale tombera plus loin que la pointe des pieds, et la station deviendra impossible; il suffit même d'élever horizontalement un des bras pour déterminer la chute de son côté. Mais si la mobilité des différentes parties du corps

peut rompre aussi facilement l'équilibre qui permet la station, elle fournit aussi les moyens de maintenir cet équilibre. Par exemple, lorsque la tête et le tronc se fléchissent sur le bassin, la partie inférieure du tronc se porte en même temps en arrière, comme on le voit dans l'action de saluer, et les masses portées en devant étant compensées par celles qui sont portées en arrière, la verticale du centre de gravité continue à tomber dans la base de sustentation. Il en arrive de même transversalement lorsque les deux bras sont élevés à la fois.

Un autre moyen non moins important pour maintenir la station chez l'homme, dans la multitude des circonstances accidentelles qui tendent à la détruire, consiste à modifier l'étendue dans diverses directions de la base de sustentation du corps. On conçoit en effet qu'il importe fort peu que la base de sustentation soit étendue d'un côté à l'autre, lorsque les causes qui tendent à rompre l'équilibre agissent d'avant en arrière, ou d'arrière en avant; il suffirait donc, en pareil cas, de placer un pied en avant pour agrandir la base dans cette direction : aussi voit-on que la condition qui concourt le plus efficacement à éviter les chutes dans différens sens, est la rapidité des mouvemens automatiques par lesquels nous rétablissons l'équilibre prêt à se rompre : la chute en avant est-elle imminente, nous avançons rapidement un pied; sentons-nous notre corps près de tomber à gauche, nous étendons rapidement le bras droit; cherche-t-on à nous renverser en arrière, nous reculons un pied et nous portons le corps en avant. L'agilité et la précision de ces mouvemens sont si nécessaires à la station, qu'il suffit de nous tromper sur la direction d'un effort ou de mettre obstacle à l'un de nos mouvemens, pour nous renverser aisément. Si, par exemple, étant placé vis à vis d'un homme, on alonge le pied gauche, de manière à le placer

derrière le talon de son pied droit, et que dans cet état on pousse inopinément son épaule gauche avec un doigt de la main droite, on le renverse avec la plus grande facilité.

Lorqu'un homme porte un fardeau placé sur son dos, il est contraint de pencher le corps en avant, afin que le centre de gravité commun de la partie supérieure de son corps et du poids étranger ne soit pas placé trop en arrière; le contraire arrive à un homme qui porte un fardeau appuyé contre sa poitrine. Si l'on essaie de porter un seau d'eau avec une main, on sera contraint de pencher fortement le corps du côté opposé; de là vient qu'il est plus facile de porter deux seaux d'eau qu'un seul, attendu qu'alors les deux poids étrangers se font équilibre, et que le corps peut rester dans la rectitude.

La nécessité de maintenir l'équilibre en reportant une partie du corps du côté opposé à celui où se trouve une prépondérance de poids, donne lieu à une sorte de régularité dans des difformités accidentelles. Supposant, par exemple, que la colonne vertébrale se trouve fléchie du côté droit dans sa partie inférieure ou lombaire, on verra bientôt sa partie supérieure se courber du côté gauche pour produire la compensation nécessaire; ce qui constituera une double flexion en S, que l'on observe en effet dans toutes les difformités de ce genre.

L'art a souvent essayé de dépasser les limites des facultés naturelles à l'homme, et l'on voit les danseurs de corde et autres bateleurs se maintenir en équilibre sur une corde étroite et tendue. Ceux qui n'ont pas acquis une très grande habileté dans ces exercices se servent d'une longue perche en bois, chargée de plomb à ses deux extrémités, qu'ils tiennent dans leurs mains, et qu'ils nomment *balancier;* les deux masses de plomb, très éloignées du centre du mouvement, rétablissent facilement les dérangemens dans

l'équilibre du corps. Mais ceux qui sont plus habiles se maintiennent par les seuls mouvemens de leurs bras, que l'on voit sans cesse dans une grande agitation pour maintenir l'équilibre du corps, toujours prêt à se rompre.

La station dans la position assise est beaucoup plus facile que toute autre, attendu que la base de sustentation est très large, et que le centre de gravité est placé très près de cette base. Mais dans cette position il est impossible de se lever en conservant la rectitude du corps, et il devient indispensable de porter le haut du corps en avant jusqu'à ce que le poids de la partie inférieure du tronc se trouve compensé, et que la verticale du centre de gravité passe par la plante des pieds.

CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES FORCES AGISSANT SUR UN CORPS ASSUJÉTI PAR UN POINT FIXE.

126. Jusqu'ici nous avons considéré les forces comme appliquées à des points matériels ou à des corps parfaitement libres d'obéir à leurs impulsions, en telle sorte qu'il ne pouvait résulter d'équilibre que dans les cas où toutes les forces se réduisant à une résultante unique, on pouvait lui opposer une force égale. Il est maintenant nécessaire d'examiner ce qui arrive lorsque des forces sont appliquées à un corps retenu par un ou plusieurs points fixes.

On entend par point fixe une disposition dans laquelle un point quelconque d'un corps ne peut éprouver aucun déplacement dans aucun sens, quelles que soient la direction et l'intensité des forces qu'on lui applique; en sorte qu'il faut considérer ce point fixe comme ayant en lui-même toutes les puissances nécessaires pour faire équilibre à celles qu'on peut lui appliquer. Cette supposition abstraite n'existe pas réellement dans la nature, car il n'y a

pas de point absolument fixe et capable de résister à toute sorte de puissances. Dans la pratique ordinaire, la résistance des points fixes dépend de la cohésion de certains corps solides que l'on emploie pour en fixer d'autres, et le point est réellement fixe quand les puissances ne sont point capables de détruire la cohésion de ce corps et de le rompre.

Il est encore très important de remarquer que, dans nos expériences ou dans nos machines, nous donnons souvent le nom de points fixes à des points qui n'ont réellement de fixité ou qui n'offrent de résistances que dans certaines directions. C'est ainsi que le couteau sur lequel repose le fléau d'une balance est un point fixe autour duquel se font les mouvemens de ce fléau; mais qu'il n'offre réellement de fixité que par rapport aux puissances de la pesanteur qui tendraient à le faire descendre, tandis qu'il deviendrait aisément mobile si on lui appliquait des forces contraires ou tendant à le faire monter.

Un axe qui entre librement dans un trou circulaire est fixe relativement à toutes les forces qui agiraient suivant les rayons du cercle. Il ne présenterait aucune fixité relativement à une force qui agirait suivant sa longueur.

En résumé, nous nommons point fixe celui qui ne peut pas être déplacé dans la direction de la résultante des forces que nous appliquons à un corps.

D'après la définition que nous venons de donner, il est évident que, quellesque soient les intensités et les directions des forces qui sollicitent un corps retenu par un point fixe, *il y aura équilibre toutes les fois que la résultante passera par le point fixe.*

Il résulte du même principe que, si la résultante ne passe pas par le point fixe, elle obligera toutes les particules du corps solide à tourner autour de ce point comme centre,

condition unique dans laquelle le point fixe puisse demeurer immobile, quoique toutes les autres particules du corps se meuvent.

On déduira avec la même facilité tous les cas d'équilibre de différentes forces sollicitant un corps fixé par un point, en se rappelant les règles que nous avons données (37 et suiv.), et faisant toujours en sorte que la résultante passe par le point fixe, comme nous aurons bientôt l'occasion de le dire en traitant des *Machines simples.*

CONDITIONS D'ÉQUILIBRE DES FORCES AGISSANT SUR UN CORPS ASSUJÉTI PAR PLUSIEURS POINTS FIXES.

127. On conçoit que les cas dans lesquels un corps solide peut être fixé par plusieurs points, sont extrêmement variés et multipliés : nous ne nous occuperons que de quelques uns des plus remarquables de ces cas.

CORPS FIXÉ PAR UN AXE.

Il peut arriver qu'un corps solide soit fixé par une suite de points situés sur la même ligne et traversant toute l'épaisseur du corps; c'est la condition idéale de ce qu'on appelle un *axe;* tandis qu'un axe matériel présente un cylindre plus ou moins solide, autour duquel un corps peut tourner.

L'équilibre est encore plus facile dans cette supposition que dans le cas d'un point fixe unique, car alors cet équilibre aura lieu, 1° lorsque toutes les forces seront dans le plan de l'axe; 2° si la résultante unique de toutes les forces est dans le plan de l'axe, passe par cet axe, ou lui est parallèle; 3° si les forces se réduisant à un couple, ce couple est dans le plan de l'axe ou dans un plan parallèle.

Les principes que nous venons de poser sur les cas d'équilibre des corps solides fixés par un ou plusieurs points fournissent la théorie des *machines simples*, et l'examen des propriétés de ces machines en rendra l'intelligence beaucoup plus facile.

DES MACHINES SIMPLES.

128. Les hommes ont imaginé, pour multiplier et varier les effets de leurs forces propres et de toutes les autres puissances qui sont à leur disposition, un nombre considérable de mécanismes divers, dans lesquels les directions des forces sont changées, leur vitesse accrue en perdant de leur intensité, ou leur intensité accrue en perdant de leur vitesse. Néanmoins, au milieu de cette variété et de cette complication, il est facile de reconnaître un certain nombre d'élémens mécaniques auxquels on a donné le nom de machines simples, et qui, par leur réunion et leurs combinaisons, forment toutes les machines composées. On reconnaît en général le *levier*, la *poulie* et le *plan incliné*, comme les trois élémens simples de toutes les machines complexes. Nous nous en occuperons successivement, ainsi que de la *balance*, du *treuil*, des *moufles*, du *coin* et de la *vis*.

DU LEVIER.

129. On donne le nom de levier à une tige solide dont la longueur est en général considérable relativement à ses autres dimensions, et qui peut d'ailleurs présenter toutes sortes de variétés de forme. Mais pour simplifier l'étude des phénomènes, on fait d'abord abstraction du poids et du volume du levier, et on le considère comme une ligne droite inflexible.

La condition essentielle du levier comme machine, c'est l'existence d'un *point fixe*, autour duquel agissent deux forces, dont l'une porte le nom de *résistance*, et l'autre le nom de *puissance*.

La situation du point fixe par rapport aux forces a fait distinguer les leviers en trois genres. Lorsque le point fixe est entre les deux forces, le levier est du *premier genre*; lorsque le point fixe est à une extrémité et la puissance à l'autre, le levier est du *second genre*; lorsque le point fixé est à une extrémité et la résistance à l'autre, le levier est du *troisième genre*. En d'autres termes, dans le levier du premier genre, le point d'appui est au milieu; dans le levier du second genre, la résistance est au milieu; dans le levier du troisième genre, la puissance est au milieu.

On nomme aussi le levier du premier genre, *interfixe*; celui du second genre, *interrésistant*, et celui du troisième genre, *interpuissant*.

La *fig.* 26 représente un levier du premier genre. F est le point d'appui; R est une masse à mouvoir représentant la résistance; P est la puissance représentée par un poids.

La *fig.* 27 représente un levier du second genre. F est le point d'appui; R est une masse représentant la résistance; P est la puissance représentée par un poids suspendu à un fil qui passe sur une poulie, afin d'agir sur le levier de bas en haut.

La *fig.* 28 représente un levier du troisième genre. F est le point d'appui; R est un corps solide représentant la résistance; et P est la puissance exercée par un poids suspendu par un fil qui passe sur une poulie, afin de tirer le levier de bas en haut.

D'après le principe que nous avons établi, que l'on peut considérer le point d'appui ou le point fixe comme une force prête à agir dans toutes les directions, en opposition

à celles qui lui seraient immédiatement appliquées, on trouve aisément les conditions d'équilibre de tous les leviers; car la puissance et la résistance sont deux forces agissant sur deux points matériels invariablement unis, et ces deux forces ont une résultante qui se trouvera détruite quand elle passera par le point fixe. Mais il existe une autre méthode de déterminer les cas d'équilibre des différens leviers, et nous croyons essentiel de la donner ici, attendu qu'elle est fondée sur ce qu'on nomme *les vitesses virtuelles*, dont nous n'avons pas encore eu l'occasion de parler.

On nomme *vitesse virtuelle* la vitesse que prendrait effectivement un point matériel actuellement en équilibre, s'il venait à se mouvoir. Cela posé, soit, *fig.* 29, le levier AB dont le point fixe est en F. Supposons que ce point fixe est placé au tiers de sa longueur; que le point A est sollicité par une force AC que nous appellerons *résistance;* et le point B par une force BD, que nous appellerons *puissance.* Nous disons que les points A et B seront en équilibre si les forces sont réciproquement proportionnelles aux longueurs des bras de levier, c'est à dire si BD est moitié de AC, comme AF est moitié de FB. En effet, supposons un moment que le levier se meuve: le point B parcourra l'arc B*b*, et le point A parcourra l'arc A*a*. Or, ces deux arcs sont inégaux et proportionnels à leurs rayons, c'est à dire aux bras de levier; et si l'on suppose que les forces AC et BD sont des masses matérielles, la quantité de mouvement d'un corps étant représentée par sa masse multipliée par sa vitesse, il faudra que la masse B soit la moitié de la masse A, pour qu'en multipliant chaque masse par sa vitesse virtuelle ou par la grandeur de l'arc qu'elle parcourrait en se mouvant, les deux produits soient égaux.

On exprime cette proposition en disant qu'il y a équilibre dans un levier quand les produits des masses par les

vitesses virtuelles sont égaux, ou bien quand les produits des masses par les longueurs des bras de levier sont égaux, ou enfin, ce qui est la même chose, *quand les poids ou les forces sont réciproquement proportionnels aux longueurs des bras de levier.*

D'après nos principes sur les forces parallèles (44), les mouvemens du levier ne changeront rien à son état d'équilibre.

Conformément aux principes sur le moment des forces (45), le *maximum* de l'énergie des forces appliquées à un levier aura lieu quand la force sera perpendiculaire au levier; elle sera d'autant moindre que la force sera plus oblique à la direction du levier, et son intensité relative sera déterminée en multipliant la force par la perpendiculaire menée du point fixe sur sa direction.

Nous avons jusqu'ici appliqué ces raisonnemens au levier du premier genre : ils s'appliquent également aux deux autres; et ce qu'on appelle *bras de levier* est toujours la distance du point fixe au point où la force s'applique. Ainsi, dans le levier du second genre (*fig.* 27), le bras de levier de la résistance est FR, et le bras de levier de la puissance est FP. Dans le levier du troisième genre (*fig.* 28), le bras de levier de la résistance est FR, le bras de levier de la puissance est FP.

Il est facile de concevoir, d'après les propriétés que nous venons de reconnaître aux leviers, que l'on peut s'en servir avec avantage pour faire équilibre à une puissance par une puissance beaucoup moindre, ou réciproquement, pour faire mouvoir avec vitesse un point donné en employant une puissance considérable, il est vrai, mais n'ayant qu'une vitesse médiocre. Ainsi, dans le levier du premier genre (*fig.* 26), si la distance RF était égale à 1, et la distance FP égale à 100, un poids de 100 livres placé

en R pourrait être équilibré par un poids d'une livre placé en P. Et comme on peut faire usage de leviers d'une très grande longueur, et même les combiner entre eux, on a ainsi la possibilité de remuer les masses les plus considérables à l'aide des plus faibles puissances; c'est ce qui faisait dire à Archimède qu'il remuerait la terre si on lui fournissait un levier et un point d'appui.

Les différens genres de levier ne présentent pas une égale facilité pour faire prédominer l'effet de la puissance. Dans le levier du premier genre la puissance peut être à volonté beaucoup plus petite ou beaucoup plus considérable que la résistance, suivant que l'on approche le point d'appui de l'une ou de l'autre de ces deux forces. Dans le levier du second genre l'intensité de la puissance n'égale jamais celle de la résistance, et sa vitesse est toujours plus grande. Dans le levier du troisième genre la puissance est nécessairement plus grande que la résistance, et animée d'une vitesse moindre.

Le levier que nous avons supposé jusqu'à présent sans volume et sans poids, a toujours, dans la pratique, un poids plus ou moins considérable, dont il devient nécessaire de tenir compte pour obtenir les conditions d'équilibre. Lorsque la largeur, l'épaisseur et la densité du levier du premier genre sont les mêmes dans toute sa longueur, et lorsque ses deux bras sont égaux, il se trouve naturellement en équilibre. Mais si ces bras sont inégaux, l'un sera nécessairement plus pesant que l'autre, et il faudra tenir compte de cette différence dans l'appréciation des forces qui se font équilibre. Dans le levier du second genre la puissance aura toujours la moitié du poids du levier à supporter; et dans le levier du troisième genre la puissance pourra être chargée de la totalité de ce poids, ou même

d'une résistance beaucoup plus considérable, si elle s'applique près du point d'appui.

Les leviers peuvent être configurés tout autrement que nous ne l'avons supposé jusqu'ici; ils peuvent former des angles; c'est ce qu'on nomme *leviers brisés.* Ainsi, dans la *fig.* 30, le levier RFP est brisé dans le point fixe. Dans ce cas, l'intensité de la force P doit être mesurée d'après la longueur de la perpendiculaire F'P, et non d'après la longueur du bras du levier FP. De même, dans un levier courbe quelconque (*fig.* 31), les longueurs des bras de levier se réduisent réellement à celles des perpendiculaires PF' et RF", quelles que soient d'ailleurs la forme et l'étendue des courbes décrites par le levier véritable.

130. Le levier simple est très fréquemment employé dans les usages de la vie et dans les opérations mécaniques, et l'on fait usage de ces différens genres suivant l'effet qu'on se propose de produire. Veut-on soulever une pierre qui repose sur le sol, on engage une barre de fer sous cette pierre; on place derrière la barre de fer, et très près de son extrémité, un corps solide résistant, et on appuie de tout le poids de son corps sur l'autre extrémité de la barre de fer. On fait usage dans ce cas d'un levier du premier genre, et la pierre sera soulevée d'autant plus aisément que la barre de fer sera plus longue et le point d'appui placé plus près de la pierre. Si la barre de fer est engagée horizontalement sous la pierre, et que son extrémité libre soit soulevée, elle deviendra un levier du second genre. Lorsqu'un homme transporte un fardeau sur une brouette, le fardeau est soulevé par un levier du second genre; l'axe de la roue est le point d'appui, le fardeau repose sur la longueur du levier, et la puissance est située à son extrémité opposée. Aussi, plus les bras de la

brouette sont longs, moins l'homme a d'efforts à faire pour la soulever.

Le levier du troisième genre est particulièrement employé dans les cas où l'on a besoin de produire une grande vitesse dans le mouvement, et où l'on dispose d'un excès de force; c'est ce qui arrive dans la pédale du rouet à filer ou dans celle du rémouleur. L'extrémité fixe de la pédale est le point d'appui; la résistance est à l'extrémité mobile de la pédale, et l'action du pied s'exerce dans l'intervalle.

La structure de l'économie animale, dans laquelle des os que l'on peut considérer comme des leviers solides sont mis en mouvement par différens muscles que l'on peut considérer comme des puissances, présente une grande variété d'applications des différens genres de levier. Nous nous contenterons de citer quelques uns des cas les plus remarquables.

L'avant-bras fléchi sur le bras, le cubitus représente un levier du premier genre; le point d'appui est situé dans l'articulation cubito-humérale et répond au centre de l'échancrure sigmoïde; la résistance est représentée par le poids de la main attachée à l'extrémité carpienne du cubitus, et la puissance produite par la contraction du muscle triceps brachial est appliquée au sommet de l'apophyse olécrane, qui forme l'extrémité supérieure du cubitus. On voit que le point d'appui est ici placé entre la résistance et la puissance, mais très près de cette dernière; d'où il résulte que l'extrémité libre de l'avant-bras est portée dans l'extension avec beaucoup de vitesse, mais avec une énergie qui est à peine le dixième de la force intrinsèque du muscle triceps. On voit encore que la puissance du triceps est à son maximum d'intensité quand l'avant-bras est fléchi à angle droit sur le bras, parce qu'alors la direction de la force est perpendiculaire au levier;

tandis que, dans une extension presque complète, l'énergie du triceps est réduite à très peu de chose, la direction de la force devenant presque parallèle à la longueur du levier. D'où il résulte qu'il est extrêmement facile d'obliger l'homme le plus vigoureux à fléchir son bras tendu.

En considérant l'ensemble du pied comme un levier horizontal, à l'aide duquel le corps est soulevé lorsqu'un homme s'élève sur la pointe des pieds ou lorsqu'il marche, on voit que ce levier est du second genre. En effet le point d'appui est situé vers la tête du premier os du métatarse qui repose sur le sol : la puissance des muscles jumeaux et solaires est appliquée par un tendon commun à l'extrémité postérieure du calcanéum ; et le poids du corps repose sur l'astragale entre les deux extrémités du levier, et plus près de la puissance que du point d'appui.

Les exemples du levier du troisième genre sont très multipliés dans l'économie animale. La mâchoire inférieure en offre un des plus remarquables : ici le levier est brisé ; en outre il est double, et les extrémités antérieures réunies par la symphyse du menton. Le point d'appui est situé postérieurement dans le condyle de la mâchoire, reçu par la cavité glénoïde de l'os temporal. La résistance est ordinairement placée à la partie antérieure ; elle consiste dans l'effort à faire pour couper ou écraser des corps solides placés entre les rangées dentaires ; elle peut se trouver tout à fait à l'extrémité du levier quand on se sert des dents incisives, ou dans d'autres points de sa longueur quand on fait usage des petites et des grosses molaires. Quant aux puissances, dont les principales sont le muscle masséter et le muscle temporal, elles sont attachées à l'angle de la mâchoire et à l'apophyse coronoïde, c'est à dire entre le point d'appui et la résistance. Dans ce levier complexe, les rapports de situation du point d'appui, de la

résistance et de la puissance, sont très susceptibles de varier. Lorsque les dents incisives sont en action, la résistance agit au bout de toute la longueur du levier; l'intensité de la puissance est diminuée d'autant; mais elle n'avait pas besoin d'une grande énergie pour couper les substances alimentaires, tandis que l'étendue des mouvemens était nécessaire pour l'ouverture de la bouche. Au contraire, dans l'action des dents molaires, qui peuvent écraser et briser des corps très durs, la résistance est placée presque au même lieu que la puissance qui jouit alors de toute son intensité. Enfin, dans un abaissement excessif de la mâchoire inférieure, l'angle de la mâchoire se portant en arrière et le condyle en avant, il peut arriver que le point d'attache de la puissance devienne postérieur au point d'appui, en sorte que la contraction du masséter détermine et maintienne la luxation de la mâchoire.

L'action du deltoïde sur l'humérus, l'action du biceps sur le radius, celle du brachial antérieur sur le cubitus, etc., sont aussi des exemples de leviers du troisième genre.

Il est remarquable que, dans presque toutes les circonstances de structure de l'économie animale, les puissances sont placées, par rapport aux résistances, d'une manière très désavantageuse relativement à l'intensité d'action, et favorablement sous le point de vue de la vitesse des mouvemens, en sorte que la promptitude dans les mouvemens est assurée par les rapports des leviers, et l'énergie de ces mouvemens, par une grande puissance musculaire qui résulte de la multiplicité des fibres qui se remarque en particulier dans les muscles situés défavorablement. Nous verrons, en traitant du saut, que cette circonstance tient à la petitesse initiale de la vitesse intrinsèque de la contraction musculaire.

DE LA BALANCE.

131. La balance est un des instrumens les plus usités et les plus importans, soit dans les besoins communs de la vie, soit dans les recherches scientifiques. Il sert à déterminer le poids des corps, en le comparant à des unités de poids précédemment déterminés. Tous ses effets dépendent de la théorie des leviers que nous venons d'exposer. On distingue deux sortes de balances, celles à bras égaux, et celles qu'on nomme *romaines*, et dont les bras sont inégaux.

132. *Balance à bras égaux.* Cette balance n'est autre chose qu'un levier considéré comme inflexible, supporté par son milieu à l'aide d'un point fixe, et disposé par ses extrémités de manière à ce que l'on puisse y suspendre des tiges, des chaînes ou des cordes qui supportent elles-mêmes des plateaux sur lesquels on peut déposer les corps qu'il est question de peser. Plaçant d'un côté le corps dont on cherche le poids, et ajoutant dans l'autre plateau autant de poids connus ou de fractions de ces poids qu'il en faut pour rétablir l'équilibre, on juge de l'exactitude de cet équilibre par l'horizontalité du levier qui se nomme *fléau* de la balance, et cette horizontalité elle-même se détermine au moyen d'une aiguille perpendiculaire au fléau, qui s'élève ou s'abaisse de son milieu, et dont la position verticale indique le point d'équilibre.

Un grand nombre de conditions sont nécessaires pour qu'une balance soit *exacte* et pour qu'elle soit *sensible*, c'est-à-dire susceptible d'indiquer les plus petites différences en poids.

La première condition est que les points de suspension des plateaux soient et restent toujours à une distance parfaitement égale du point fixe du fléau. On atteint ce but en

armant le milieu du fléau de deux couteaux d'acier trempé, qui reposent sur deux surfaces légèrement concaves du même métal, et en établissant aux deux extrémités du fléau deux autres couteaux sur lesquels reposent les crochets qui suspendent les plateaux.

La seconde condition est que le fléau ne soit pas susceptible de se courber d'une manière sensible sous l'effort des poids que l'on suspend à ses extrémités. Nous sentirons bientôt l'importance de cette condition, que l'on remplit autant que possible en construisant le fléau en fer ou en acier, en lui donnant plus de force dans son milieu qu'à ses extrémités, et lui donnant aussi beaucoup plus d'épaisseur verticale que d'épaisseur transversale; mais surtout en n'employant chaque balance qu'à des pesées bien inférieures à la force qui serait nécessaire pour courber leur fléau.

Une troisième condition non moins indispensable est que le point d'appui du fléau soit placé un peu plus haut que les deux points d'appui des plateaux, c'est-à-dire un peu au dessus d'une ligne droite qui passerait par ces deux points d'appui. Cette condition exige, pour être bien comprise, que nous examinions d'abord l'équilibre du fléau isolé.

Le fléau d'une balance est un corps solide alongé, qui a un *centre de gravité* et un *centre de suspension*. Si le centre de gravité de ce corps était placé au dessus du point de suspension, ce serait le cas de ce que nous avons nommé équilibre instable, car dans tous les mouvemens d'oscillation du fléau le centre de gravité pourrait descendre en tournant autour du point fixe. Si le centre de gravité était placé exactement au point de suspension, l'équilibre pourrait avoir lieu dans toutes les situations du fléau, il n'y aurait, par conséquent, aucune raison pour qu'il restât dans une position horizontale, ce qui est nécessaire pour

apprécier les petites différences dans les poids que l'on pourra suspendre aux extrémités de ce fléau. Si le centre de gravité du fléau se trouve placé au dessous du point de suspension, ce sera le cas de l'équilibre stable, et le fléau demeurera horizontal, à moins qu'on n'emploie une force quelconque pour l'incliner; et alors le centre de gravité s'élevant autour du centre de suspension, tendra bientôt à redescendre; ce qui déterminera des oscillations, jusqu'à ce que le fléau redevienne horizontal. Si l'abaissement du centre de gravité au dessous du point de suspension est très peu de chose, la plus petite force, un milligramme par exemple, suffira pour incliner le fléau, qui sera très sensible, quoique dans un état d'équilibre stable. On obtient cet état du fléau en plaçant au dessous du point de suspension une petite masse additionnelle, que l'on peut même rendre mobile au moyen d'une vis, de manière à diminuer ou à augmenter à volonté la sensibilité de la balance. Le fléau doit être mis très exactement dans les conditions que nous venons d'indiquer, avant de songer à y suspendre des poids.

Lorsque les plateaux et les poids qu'ils peuvent supporter sont suspendus aux extrémités du fléau de la balance, la somme des forces de pesanteur qui les sollicite s'exerce par une résultante commune, dont la direction est toujours verticale, et qui se trouve appliquée au point de suspension de ces plateaux; nous n'avons donc point à considérer, dans les conditions d'équilibre, l'influence que ces masses nouvelles peuvent apporter à la situation du centre de gravité de la masse commune du fléau et des poids, et nous devons considérer ces poids comme des forces parallèles agissant sur les extrémités d'un levier.

Les circonstances de l'équilibre absolu de la balance chargée de ses poids sont les mêmes que celles de l'équi-

libre du fléau isolé ; mais l'influence de la situation des points de suspension devient beaucoup plus considérable. En effet, soit (*fig.* 32) A F B un levier dont le point de suspension serait placé beaucoup plus bas que ses extrémités : les forces AC et BD étant égales, l'équilibre mathématique pourrait avoir lieu; mais il serait instable, et le plus petit excès d'un côté renverserait tout l'appareil; car, si le point A venait à descendre, le moment de la force AC s'accroîtrait continuellement, jusqu'à ce que ce bras du levier fût arrivé en A′F, tandis que le moment de la force opposée, BD, irait toujours en décroissant jusqu'à la position B′D′. C'est à cette disposition qu'on donne le nom de balance *folle*, ou qui ne peut pas être fixée en équilibre.

Si au contraire le point de suspension était placé beaucoup plus haut que les extrémités du levier, une différence considérable dans les poids deviendrait à peine sensible; car, supposant que le point A (*fig.* 33) vienne à descendre par l'excès de la force AC, le moment de cette force irait en diminuant, tandis que le moment de la force BC s'accroîtrait rapidement, de façon que l'équilibre serait rétabli entre deux forces inégales par la plus légère inclinaison du bras de levier. Cette dernière disposition, réduite à la moindre quantité possible, est la condition indispensable d'une balance usuelle. Quand elle est trop prononcée, elle constitue le défaut de sensibilité, ou ce qu'on appelle *balance paresseuse.*

Lorsqu'on suspend à un fléau des poids considérables relativement à sa masse propre, la situation de son centre de gravité au dessus ou au dessous du point de suspension devient peu importante, parce que son influence est prédominée par les effets des leviers anguleux dont nous venons de parler: mais lorsqu'un fléau d'une masse assez considérable est destiné à peser de très petits poids, comme cela

arrive dans les balances délicates, la situation de son centre de gravité devient une condition très importante, puisque son influence ne pourrait pas être compensée par les effets des très petites forces qui doivent agir sur lui.

On concevra maintenant avec facilité les inconvéniens de la flexion du fléau de la balance, puisque dans cette flexion les points de suspension des plateaux sont abaissés, ce qui élève relativement le point de suspension du fléau. Aussi remarque-t-on qu'une balance sensible à un demi-milligramme quand elle n'est chargée que de quelques grammes, n'est plus sensible qu'à un milligramme quand elle est chargée d'un poids plus considérable.

On construit des balances de toutes les forces et de toutes les dimensions, depuis les fléaux grossiers qui peuvent peser plusieurs milliers de kilogrammes, et qui ne sont sensibles qu'à quelques centaines de grammes, jusqu'aux balances d'essai, qui ne doivent jamais être chargées que d'un kilogramme au plus, et qui indiquent des différences de poids d'un demi et même d'un quart de milligramme.

La connaissance de la quantité matérielle ou de la masse d'un nombre quelconque de corps entrant dans tel ou tel composé, est certainement une des bases principales des connaissances physiques et chimiques; il devient donc indispensable d'avoir en toute espèce de recherche, à sa disposition, des balances qui soient à la fois très exactes et très sensibles : l'une de ces conditions est plus facile à remplir que l'autre: on peut toujours avoir une balance sensible, ou la rendre telle si elle ne l'est pas; mais il est au contraire très difficile d'obtenir un instrument de ce genre, dans lequel les deux bras de levier soient rigoureusement égaux. Heureusement il existe un moyen de corriger l'im-

perfection qui consiste dans l'inégalité des bras de levier, ce moyen porte le nom de *double pesée.*

Étant donnée une balance dont les plateaux A et B ne se trouveraient pas exactement suspendus à des distances égales du point fixe; ayant d'abord mis cette balance en équilibre, on placera le corps à peser dans le plateau A et les poids dans le plateau B jusqu'à équilibre : ce résultat sera affecté d'une erreur; mais si dans une nouvelle pesée on place le corps dont on cherche le poids dans le plateau B, et les poids eux-mêmes dans le plateau A, cette nouvelle opération sera nécessairement affectée d'une erreur exactement égale, mais opposée, à celle qui affectait le premier résultat, en sorte qu'en prenant la moitié de la somme des deux résultats obtenus, ou la moyenne proportionnelle des deux pesées, on sera certain d'avoir avec la plus grande précision le poids du corps soumis à l'expérience.

Cette méthode si commode quand on est privé d'instrumens exacts, ne doit pas être négligée dans les cas importans, même en faisant usage de très bonnes balances. On peut encore placer le corps à peser dans un plateau, le mettre en équilibre avec des corps quelconques placés dans l'autre plateau, ôter alors le corps à peser et lui substituer des poids jusqu'à l'équilibre; on voit que le corps à peser et les poids ont agi par le même bras de levier pour faire équilibre à la même masse, et qu'ainsi ils sont égaux quelle qu'ait pu être l'inégalité des deux bras de levier.

DE LA ROMAINE.

133. On donne le nom de *balance romaine* à un instrument dans lequel l'équilibre peut être établi entre deux poids inégaux, par la différence des longueurs des bras de levier sur lesquels ces poids agissent. Il est construit sur les

principes suivans : Soit A G (*fig.* 34) un levier inflexible suspendu par un point fixe situé en F : si l'on attache un corps quelconque P, qu'il s'agit de peser, dans un point A très voisin du point F; si d'autre part on dispose un poids *p* de façon qu'on puisse lui faire parcourir la longueur du bras de levier F G, il est évident que ce petit poids pourra faire équilibre au poids P, si on le place dans un endroit tel, que les longueurs des bras de levier soient réciproquement proportionnelles aux masses, en faisant abstraction du poids du levier; mais comme ce poids est toujours très réel, on détermine ordinairement par expérience les différens points du bras de levier sur lesquels il faut placer le poids *p* pour qu'il fasse équilibre à 1, à 2, à 3, ou à un plus grand nombre de kilogrammes. On voit que, dans cette disposition, le poids qui sert à peser est constant, et qu'on détermine celui du corps que l'on pèse par la longueur du levier. La distance A F est ordinairement très petite, et alors la romaine ne peut peser que des corps très lourds; mais on lui donne quelquefois un double point de suspension B dont on se sert en renversant la machine, et alors la distance AB étant double de A F, la machine peut peser des corps moitié moins lourds.

Les règles que nous avons établies en parlant de la balance à bras égaux, pour la situation des points de suspension et du centre de gravité, s'appliquent également à la romaine; mais malgré ces précautions, elle ne peut jamais fournir qu'un équilibre non stable, attendu la grande inégalité des bras de levier. On n'emploie guère cet instrument que pour des pesées approximatives ou pour de très grands fardeaux.

On connaît plusieurs balances composées, dont le système général se réduit aisément à la romaine simple.

La *balance de Sanctorius* consiste en un plancher carré

qui repose par quatre points sur deux leviers angulaires qui reposent eux-mêmes, par leur double extrémité, sur deux points fixes, et par leur angle sur un troisième levier longitudinal, qui fait mouvoir, au moyen d'une tringle, un quatrième levier servant de fléau, et portant un plateau dans lequel il suffit d'employer de très petits poids, formant, par exemple, la 240e partie du poids total reposant sur le plancher, pour faire équilibre à ce poids. Ce rapport dépend des diverses relations de longueur qui existent entre les différens bras de tous les leviers qui composent la machine.

La *bascule portative* de Quintenz est fondée sur des principes analogues; mais son plancher porte sur trois points d'appui, dont deux répondent à un levier coudé, tandis que le troisième est directement suspendu au fléau de la balance, aussi bien que l'angle du levier coudé, disposition qui rend la balance très sensible, et en même temps susceptible d'un équilibre stable.

DE LA RÉSISTANCE DES CORPS SOLIDES EMPLOYÉS COMME LEVIERS.

134. Nous avons fait sentir, en parlant de la balance, que le fléau, qui en fait la partie essentielle, était susceptible de flexion; mais il y a une foule d'autres circonstances dans lesquelles des corps solides de forme alongée ont à supporter des pressions ou des fardeaux plus ou moins considérables, sous lesquels ils peuvent fléchir ou se rompre. Tel est le cas des poutres ou pièces de bois principales qui entrent dans la construction des édifices. La physique fournit un certain nombre de règles qui peuvent servir à prévoir et à apprécier ces sortes d'effets; nous croyons devoir les indiquer ici.

Le cas le plus simple et le plus ordinaire est celui dans

lequel une pièce de bois repose librement sur des points fixes par ses deux extrémités. Le premier effort qu'un semblable levier doit supporter est celui de son propre poids; et en effet, tous les corps placés dans cette position, et le verre lui-même, malgré sa rigidité, se courbent sensiblement à la longue. On peut considérer la somme des pesanteurs de tous les points du corps comme agissant par une résultante dans le milieu du levier; et l'on conçoit que les effets en seront d'autant plus marqués que le levier sera plus long, au point que le corps pourra se rompre sous son propre poids: c'est ce qui arriverait à une pièce de bois de chêne de 33 mètres de long sur un décimètre d'équarrissage. On connaît beaucoup d'exemples vulgaires de semblables effets; on sait, par exemple, que les queues de billard ne conservent leur rectitude qu'autant qu'on les place dans une position verticale.

Si, indépendamment de son propre poids, le corps dont nous venons de parler est chargé d'un fardeau plus ou moins considérable, la faculté de le supporter, ou la résistance qu'il opposera à sa rupture, sera toujours, 1° en raison inverse de sa longueur; 2° en raison directe de sa largeur; 3° en raison directe du carré de son épaisseur; c'est à dire que si la pièce de bois est moitié plus courte, elle portera un fardeau double; que si la pièce de bois est deux fois plus large, elle portera un fardeau double; que si la pièce de bois est deux fois plus épaisse, elle portera un fardeau quadruple. D'où il résulte que l'on obtient de grands avantages dans les constructions, sous le rapport de l'économie et de la solidité, en employant des pièces de bois d'une grande épaisseur sur une petite largeur. On voit, en effet, qu'une planche posée à plat fléchit sous le moindre fardeau, tandis qu'en la posant de champ, elle offre une résistance très considérable.

Si, dans la position que nous avons supposée jusqu'à présent, la pièce de bois vient à se rompre, on conçoit que la fracture aura lieu dans un seul point et dans le milieu de sa longueur; mais s'il arrive, comme dans la plupart de nos constructions, que la pièce de bois soit solidement fixée par ses deux extrémités dans l'épaisseur d'une muraille, elle ne pourra plus se rompre seulement dans son milieu, et il faudra qu'elle se brise simultanément vers ses deux extrémités. Cette circonstance double à peu près la résistance dont elle est susceptible.

Une pièce de bois peut être solidement fixée par une de ses extrémités dans une muraille, et chargée de divers poids. Sa résistance suivra les lois que nous avons indiquées pour les largeurs et épaisseurs; elle sera moitié moindre que si la pièce était soutenue par les deux bouts. Le maximum de l'effet de la puissance aura lieu dans le point qui touche la muraille. De là vient la nécessité de soutenir la pièce de bois dans ce point, ou d'en augmenter l'épaisseur, comme on le fait au moyen de ce qu'on nomme *consoles* ou *liens*.

La résistance à la fracture dépendant essentiellement du diamètre du corps, comme nous l'avons indiqué en parlant de la flexibilité, on pourra obtenir une solidité supérieure avec la même quantité de matière, en l'écartant de l'axe du corps et la disposant en cylindre creux. Cet effet est si prononcé, qu'à poids égal un cylindre creux peut offrir une résistance dix fois plus grande qu'un cylindre solide. Les os des animaux et les plumes des oiseaux sont des exemples frappans de cet artifice mécanique.

DE LA POULIE.

135. La poulie est une machine simple, fort usitée dans les arts mécaniques. Elle consiste en un cylindre fort court,

qui porte à son centre un axe solide autour duquel il peut tourner librement ; cet axe est supporté par ses deux extrémités au moyen d'une *chappe.* La circonférence de ce cylindre porte un enfoncement demi circulaire que l'on nomme la gorge de la poulie, et qui peut recevoir une corde. Si l'on se représente une semblable machine suspendue par sa chappe comme dans la *fig.* 35, on concevra qu'elle doit rester indifféremment en équilibre dans toutes les situations, puisque l'axe passera à la fois par le centre de gravité et par le centre de figure.

Si l'on suppose qu'une corde soit passée dans la gorge de la poulie, et qu'à chacune de ses extrémités soient attachés des poids égaux C et D, il est évident que ces poids seront en équilibre, car le point fixe est en F, et les bras de levier sont F A et F B, c'est à dire deux rayons d'un cercle, et par conséquent nécessairement égaux. La poulie représente donc pour le moment le fléau d'une balance. Mais si l'un des deux poids vient à monter ou à descendre, la corde fera mouvoir la poulie sur son axe ; et, à cause de la figure circulaire, les deux bras de levier F A et F B changeront continuellement, mais en restant toujours d'une longueur égale. On peut donc définir la poulie, un levier à bras égaux, dans lequel les momens des forces sont invariables, quelque mouvement qu'on lui imprime.

Non seulement les choses sont ainsi quand les deux forces opposées sont parallèles, mais même lorsqu'elles forment des angles quelconques. On voit, en effet, que si la force B D est transportée en B'D', elle agira perpendiculairement au bout du levier FB', qui sera encore un rayon de la poulie.

La machine que nous venons de décrire a donc pour avantage, lorsqu'elle est fixée par sa chappe, de changer à volonté la direction des forces sans leur faire rien perdre

de leur intensité, si ce n'est par le frottement inévitable qui se passe dans l'axe. Elle est appliquée, dans cet état de simplicité, à un grand nombre d'usages vulgaires, et particulièrement pour faciliter l'extraction de l'eau des puits, en permettant à l'homme de tirer la corde de haut en bas, ce qui est avantageux à l'emploi de sa force propre.

On se sert aussi de portions de poulies adaptées à l'extrémité de certains leviers, pour donner de la fixité à la direction du mouvement des puissances qui agissent au bout de ces leviers.

Si l'économie animale ne présente pas d'exemple d'une poulie mobile sur un axe, elle offre un grand nombre de dispositions qui s'en rapprochent beaucoup par leurs effets. On donne même le nom de *poulies cartilagineuses* à quelques surfaces articulaires, comme celles qu'on remarque à l'extrémité inférieure de l'humérus. Dans ce cas, comme dans celui de la tête sphérique et des condyles du fémur, des surfaces polies et presque circulaires tiennent les parties mobiles qui sont en rapport avec elles à une distance constante du centre des mouvemens, et donnent ainsi de l'uniformité à l'action des forces qui les entraînent. Seulement ici, et pour suivre la comparaison, c'est en quelque sorte la corde qui glisse sur la poulie, et non la poulie qui tourne avec la corde. C'est ainsi que le tendon commun des extenseurs de la jambe glisse avec la rotule sur la gouttière que forme antérieurement la réunion des condyles du fémur.

Un simple changement de situation suffit pour donner à la poulie un avantage d'un autre ordre et d'une grande importance. Supposons le corps qu'il s'agit de soulever, ou la puissance qu'il s'agit de vaincre, appliqué à la chappe de la poulie (*fig.* 36), cette chappe étant tournée en bas : si l'une des extrémités D de la corde est attachée à un point

fixe, et si l'on exerce sur l'autre extrémité E une puissance capable de faire équilibre au poids, on verra que la poulie représente alors un levier du second genre; que le point A peut être considéré comme le point d'appui; que le point F répond à la résistance, et que la puissance est appliquée au point B; en sorte que la puissance devra être à la résistance en raison inverse de leurs bras de levier, ou comme FA est à BA; d'où il suit que la puissance sera moitié de la résistance.

On voit que, dans cette disposition de la poulie, on peut faire équilibre à un poids ou à une résistance donnée, avec une puissance qui n'a que la moitié de son intensité, et que le point fixe supporte exactement l'autre moitié.

Si, dans l'état d'équilibre que nous venons de décrire, l'extrémité E de la corde est tirée de bas en haut, le chemin parcouru par le point E sera double du chemin parcouru par le point F ou par la résistance elle-même, ce qui se déduit des longueurs des bras de levier, et ce qui devient sensible, en considérant que si le point F doit s'élever d'un décimètre, il devient nécessaire que chacun des côtés de la corde soit raccourci d'un décimètre, ce qui exige que le point E, qui est le seul mobile, s'élève de deux décimètres.

Dans l'application importante que nous venons d'indiquer, il est essentiel de remarquer que le poids de la poulie et de sa chappe s'ajoutent toujours au poids qu'il s'agit de soulever.

Nous avons supposé le parallélisme des deux portions de la corde qui passe sur la poulie, et c'est le cas dans lequel une puissance donnée produit le maximum d'action, puisqu'elle agit perpendiculairement au levier A B; et l'on conçoit que si le point fixe était en D′, et la puissance appliquée au point E, il faudrait employer pour vaincre la

résistance, une force d'autant plus grande que l'obliquité serait plus marquée : car si la corde devenait droite et horizontale comme en E″ D″, la puissance n'aurait plus aucune action pour élever la poulie.

Si les directions des cordes se croisaient au dessus de la poulie, et que les extrémités devinssent D‴ E‴, la force perdrait de son énergie dans les mêmes proportions et pour les mêmes raisons.

Il est presque superflu de remarquer que dans quelque situation que soient les deux cordes A D et B E, la chappe de la poulie prendra une direction verticale, qui divisera en deux parties égales l'angle quelconque que les deux cordes pourront former entre elles.

Les réverbères suspendus dans les rues de la capitale offrent un exemple de l'emploi de la poulie simple dans le sens dont nous venons de parler. Une corde (*fig.* 37) est tendue et fixée d'une maison à l'autre ; une seconde corde est fixée sur la première au point D ; elle passe en F dans une poulie attachée au réverbère ; elle remonte et va passer sur une seconde poulie fixée au point E, puis sur une troisième fixée à la muraille au point E′, où s'exerce l'action qui doit élever le réverbère. La poulie F donne un avantage de moitié à la puissance employée ; les poulies E et E′ ne servent qu'à en changer la direction pour en rendre l'application plus commode.

DU TREUIL.

136. Si l'on conçoit une poulie portée sur un axe fixe, et qui, sur son épaisseur, présente plusieurs gorges circulaires de différens diamètres, on trouvera dans cette disposition le moyen de faire équilibre à une résistance donnée par des puissances très variables, et l'on pourra, en quel-

que sorte, établir à volonté toutes sortes de rapports entre la puissance et la résistance. Ainsi (*fig.* 38), le poids D, dont la corde agit au bout du rayon F B de la plus grande poulie, peut, à volonté, faire équilibre au poids C qui lui est égal et qui agit au bout du levier F A égal à F B, au poids C′ qui est double et qui agit au bout du rayon F A′, moitié de FP, et au poids C″ qui est quadruple, et qui agit au bout du rayon F A″ qui n'est que le quart de FB. On peut porter ces différences très loin; en sorte que le rayon F B soit celui d'une très grande roue, et le rayon F A′ celui d'un cylindre d'un petit diamètre. C'est ce qui constitue les machines nommées *treuil*, *tour*, *cabestan*, etc.; et l'on conçoit que dans ce cas, comme dans tout autre, les chemins parcourus sont en raison directe des bras de levier, puisque la grande roue décrit toute sa circonférence dans le même temps qu'un point du petit cylindre décrit la sienne, La mécanique appliquée donne un grand nombre de dispositions variées aux différentes parties de cette machine. Ainsi, la grande route peut être garnie à sa circonférence d'une suite d'échelons sur lesquels un homme appuie les pieds et les mains, comme dans la roue des carrières : le cylindre peut être placé verticalement et traversé par deux grands leviers qui se croisent à angles droits, et à l'extrémité desquels s'applique la puissance, etc.

DES MOUFLES.

137. On a imaginé de réunir un certain nombre de poulies dans des machines qu'on nomme *moufles*, et qui ont pour objet de diminuer considérablement l'intensité de la force nécessaire pour vaincre une résistance donnée. On prendra une idée claire de la composition des forces, dans ces sortes de machines, par celle qui est dessinée (*fig.* 39).

On voit que, pour la première poulie A qui porte le poids C, la moitié du poids est supportée par le point fixe F où se trouve attachée la corde, et que l'autre extrémité D de cette corde n'a plus à vaincre que la moitié de l'effort. Mais cette extrémité est attachée à la seconde poulie A′, par laquelle la moitié de cet effort est transportée au second point fixe F′, en sorte qu'il ne faut plus que le quart de la force à l'autre extrémité D′ de la corde. Mais cette extrémité étant encore attachée à une troisième poulie A″, la moitié de ce quart est reportée à un troisième point fixe F″, et l'autre extrémité de la corde D″ pourra être mue par un huitième du poids primitif. Enfin cette corde pourra passer sur la poulie fixe K pour ramener la direction de la force agissante en D‴. On dit que les trois poulies A, A′, A″, sont mouflées, et que la puissance nécessaire pour soulever un poids donné sera diminuée de moitié à chaque poulie employée, et sera par conséquent la moitié, le quart, le huitième ou le seizième de la résistance, suivant qu'on aura employé une, deux, trois ou quatre poulies. Le moufle que nous venons de décrire, très commode pour concevoir la théorie de ses effets, serait fort incommode dans l'usage habituel, à cause de la multiplicité de ses points fixes et du grand espace qu'occupent les poulies. On emploie de préférence ceux qui sont dessinés (*fig.* 40 et 41), parce qu'ils n'exigent qu'un seul point fixe et occupent très peu de place. Leur théorie est absolument la même, en faisant attention que toutes les poulies qui tiennent au point fixe n'ont aucune influence sur le rapport de la force à la puissance, et ne servent qu'à renvoyer successivement la même corde sur toutes les poulies inférieures qui constituent véritablement le moufle.

DU PLAN INCLINÉ.

138. Le plan incliné, dont nous avons donné la théorie (73), est employé, dans sa simplicité, à un assez grand nombre d'usages. Ainsi une route suivant directement la pente escarpée d'une montagne serait tout à fait impraticable; mais en lui faisant décrire des sinuosités, on augmente la longueur du plan incliné sans rien changer à sa hauteur; on diminue par conséquent dans la même proportion l'intensité de la force qui tendrait à faire descendre les corps le long de ce plan incliné, et conséquemment la puissance nécessaire pour les élever le long du même plan. S'il est question d'élever un fardeau reposant sur le sol pour le placer sur une charrette, on dispose un plan incliné formé de deux pièces de bois parallèles, et qui conduit le fardeau du niveau du sol à celui de la voiture, en sorte qu'il n'est plus nécessaire de vaincre la totalité du poids du corps, mais seulement la portion relative à l'inclinaison plus ou moins grande du plan incliné. La voiture est quelquefois susceptible de se renverser à volonté pour constituer elle-même le plan incliné. Ces applications simples sont d'un faible avantage en comparaison d'une des machines les plus importantes qui existent, qui porte le nom de *vis*, et qui se réduit en réalité à plusieurs plans inclinés.

DE LA VIS.

139. On donne le nom de *vis* à un corps cylindrique de bois ou de métal, à la surface duquel on a tracé circulairement une hélice régulière formant un enfoncement angulaire, carré ou arrondi, de manière à laisser entre chaque tour de l'hélice une saillie correspondante, comme on le voit (*fig.* 42). Cette pièce cylindrique ainsi travaillée s'introduit dans une autre pièce creuse qui se nomme

l'écrou, et dans l'intérieur de laquelle se trouvent des saillies et des enfoncemens qui répondent exactement aux enfoncemens et aux saillies que présente la vis. Dans cet état de choses, si la vis est fixée, et qu'on fasse décrire une circonférence à l'écrou, il changera de place suivant l'axe de la vis, et avancera précisément de l'intervalle qu'il y a d'un tour de l'hélice à l'autre. Le même effet aura lieu pour la vis, si l'écrou est fixé.

On conçoit aisément que la portion d'hélice qui forme ce qu'on appelle un pas de la vis, représente un plan incliné contourné circulairement autour du noyau de la vis, et l'on peut s'en faire une idée sensible en considérant l'escalier d'une tour, qui est une véritable vis disposée de manière que l'on puisse marcher sur la face supérieure de l'hélice saillante. On s'élève peu à peu, en parcourant cet escalier, jusqu'au sommet de la tour, comme on ferait le long d'un plan incliné qui aurait pour hauteur celle du bâtiment, et pour longueur le développement rectiligne de toute l'hélice qui compose l'escalier. Il en est absolument de même pour une vis quelconque; car on voit (*fig.* 42) qu'un seul pas de vis développé en ligne droite donne un plan incliné *a b*, qui se trouve parcouru quand la vis ou l'écrou ont décrit l'un sur l'autre un tour entier.

S'il existe une résistance qui s'oppose à la marche de l'écrou de D en A, et une puissance appliquée à l'extrémité E d'un levier qui fasse tourner l'écrou, la résistance pourra être considérée comme un poids qui serait posé sur le plan incliné *a b*, tandis que la puissance qui fait tourner l'écrou pourra être considérée comme une force tendant à élever le poids le long du plan incliné, c'est-à-dire que la résistance sera à la puissance comme la longueur du plan incliné, qui est le développement d'un pas de vis, est à la hauteur de ce plan incliné, qui n'est autre chose que l'intervalle d'un pas de vis à l'autre.

Il faut remarquer que dans le mouvement des écrous sur leur vis il existe un frottement très considérable qui fait perdre une grande partie de la puissance employée, mais qui est précisément la cause d'un des plus grands avantages de cet instrument. En effet, s'il n'y avait que très peu de frottement dans le mouvement de la vis, après qu'on l'aurait employée à serrer fortement ou à fixer solidement certains corps, la puissance cessant d'agir, la vis ou l'écrou redescendraient le plan incliné qu'on leur a fait monter, et l'action cesserait; tandis que le frottement s'accroissant à mesure que la vis est plus serrée, celle-ci reste en place, comme il arrive aux vis dont on se sert pour fixer les serrures et autres garnitures de fer dont on fait un si fréquent usage.

Il résulte de ce que nous venons de dire que la vis doit avoir d'autant plus de force comme moyen mécanique, que le pas de vis est plus fin, et que les chemins parcourus sont en raison inverse. Il arrive quelquefois que l'on trace simultanément plusieurs hélices sur une même vis : leur plan incliné est alors beaucoup plus rapide; c'est ce qu'on voit dans les vis des balanciers.

Les usages de la vis sont si multipliés et si connus, que nous nous contenterons d'en citer deux.

On emploie des vis très fines et très régulièrement construites pour produire, dans les machines exactes, des mouvemens réguliers dont on peut ainsi mesurer précisément l'étendue, même dans ses plus petites divisions. Si, par exemple, une vis était faite sur un pas d'un dixième de ligne, qu'une de ses extrémités portât une aiguille répondant à un cadran, et si la circonférence de ce cadran était divisée en cent parties, chacune d'elles répondrait à un déplacement de la vis de un millième de ligne; et comme les arts possèdent des moyens certains d'obtenir des vis

extrêmement fines et régulières, cette méthode présente un des moyens les plus précieux pour diviser l'étendue avec délicatesse et précision.

Archimède a fait de la vis une application toute particulière dont nous parlerons en traitant du mouvement des fluides.

DU COIN.

140. Le coin est une machine extrêmement simple, d'un grand usage, et dont la théorie se déduit naturellement de celle du plan incliné. Si nous supposons, en effet (*fig.* 43), un coin DCB, actuellement employé à écarter deux moitiés d'une pièce de bois, nous pouvons le considérer comme présentant deux plans inclinés adossés l'un à l'autre; et dans l'effet qu'on veut produire il s'agit de porter les points *a*, *b*, vers les sommets D et B des plans inclinés. Ce sera sur la tête du coin qu'on appliquera ordinairement la puissance qui doit produire cet effet; mais les choses se passeront de la même manière que dans le cas contraire, et il est évident que la force à employer devra être à la résistance à vaincre comme la somme des hauteurs des plans inclinés, ou comme la largeur de la tête du coin sera à sa longueur. On observera aussi que le frottement deviendra d'un grand secours pour maintenir le coin dans le point où il aura été introduit, en attendant qu'un second effort le pousse plus loin : aussi voit-on que des coins trop polis sont rejetés au dehors après avoir été enfoncés par la percussion dans une pièce de bois.

Outre les usages vulgaires des coins proprement dits, une foule d'instrumens agissent de la même manière, comme la plupart des outils de menuiserie et des instrumens tranchans. Les dents de la scie elle-même ne sont pas sans analogie avec la machine simple dont nous venons de parler.

DES MACHINES COMPOSÉES.

141. Le génie de l'homme a modifié et combiné de tant de manières différentes les machines simples dont nous avons essayé de donner une idée, que les machines composées sont devenues innombrables. Néanmoins il est toujours possible de décomposer par la pensée ces grandes combinaisons et d'y reconnaître les élémens simples dont nous avons parlé. Par exemple, les roues dentées sont des espèces de poulies qui se mettent en mouvement les unes par les autres, en s'accrochant en quelque sorte par leur circonférence; et l'on conçoit que les rapports des forces aux puissances dépendent des rayons de ces roues ou du nombre des dents qu'elles portent à leur circonférence, si ces dents sont égales dans les différentes roues.

La division du temps que présentent avec tant d'exactitude nos belles horloges est obtenue par des rouages de cette espèce; mais il entre de plus dans leur composition une foule de leviers, de vis et même des treuils et des poulies ordinaires ou mouflées. Il n'entre pas dans notre sujet de décrire en particulier aucune de ces constructions complexes; il nous suffit d'avoir indiqué la nature de leur composition.

DES CORPS SOLIDES LIBRES EN MOUVEMENT.

142. Les corps solides ayant une figure, un volume, une masse et un centre de gravité, ces différentes circonstances doivent entrer en considération, quand on s'occupe du mouvement que peut prendre un corps solide sollicité par une ou plusieurs puissances. On conçoit en effet qu'une seule puissance, ou la résultante de plusieurs, peut passer

par le centre de gravité du corps ou par tout autre point de son volume, et que plusieurs puissances peuvent se trouver appliquées à différens points de la figure du corps, dans des directions variables et à différentes distances du centre de gravité. Ce qui donne lieu à différens genres d'effets que nous allons successivement passer en revue.

Pour l'intelligence de ces effets, il est nécessaire de remarquer que le centre de gravité, qui est déterminé par la situation de la résultante des forces de la pesanteur, joue un rôle très important dans les mouvemens réels des masses matérielles. Le déplacement qu'elles éprouvent s'estime par le chemin réel que le centre de gravité a parcouru. Dans ce déplacement, toutes les parties du corps peuvent se mouvoir simultanément avec le centre de gravité ; mais il peut arriver aussi que toutes les parties du corps se meuvent circulairement autour de ce centre de gravité qui demeure immobile, et même encore que le centre de gravité se meuve dans une direction avec toutes les particules du corps, tandis que d'une autre part ces particules se meuvent circulairement autour de ce même centre de gravité.

Toutes ces circonstances, qui font du centre de gravité une sorte de point fixe pour les mouvemens des autres parties du corps, lui ont fait donner le nom de *centre dynamique*. Nous nous contenterons d'exposer successivement les différens cas de mouvement d'un corps solide, considérant ces propositions comme démontrées par des méthodes dans le détail desquelles il ne nous est pas permis d'entrer.

1° Lorsqu'une seule force ou une seule résultante de plusieurs forces passe par le centre dynamique d'un corps solide, le corps se meut dans la direction de cette force et sans rotation. C'est le cas d'une bille élastique tombant sur un plan horizontal et se réfléchissant.

2° Si un corps solide est sollicité par deux forces égales opposées, et appliquées à des distances égales du centre dynamique, ce que nous avons appelé un couple de forces, le centre dynamique reste en repos, et le corps tourne autour de lui comme autour d'un point fixe.

Soit, par exemple, le cercle C (*fig.* 44) sollicité par les forces A B et D E : le point C restera immobile, et le cercle entier prendra un mouvement de rotation.

3° Si un corps solide est sollicité par une seule force qui ne passe point par le centre dynamique, il en résultera deux mouvemens : l'un de translatiou du centre dynamique, et l'autre de rotation du corps autour de ce centre. Soit, par exemple (*fig.* 45), une force A B appliquée vers le milieu du rayon d'un cercle, elle tendra à faire tourner ce cercle autour de son centre; mais dans ce mouvement virtuel elle trouvera, dans l'inertie même du corps, une puissance antagoniste que l'on pourra exprimer par la ligne D E, et la résultante de ces deux forces fera mouvoir le centre de gravité suivant la ligne C K. Mais il restera à la force A B un surcroît d'intensité exprimé par B B′, qui sera employé à faire tourner le corps autour du point C.

On conçoit que la vitesse de rotation sera d'autant plus grande que le point d'application de la force sera plus éloigné du centre de gravité, et que le déplacement de ce centre sera d'autant moindre.

4° Tout corps solide qui contracte un mouvement de rotation l'exécute nécessairement autour d'une ligne qui traverse sa masse et qu'on nomme *axe de rotation*. Cet axe de rotation peut être fixe ou en mouvement, puisque nous avons vu que la rotation pouvait avoir lieu pendant l'immobilité du centre de gravité ou pendant que lui-même était transporté dans l'espace.

5° Lorsqu'un corps commence à tourner, par suite d'une

impulsion, autour d'une ligne quelconque, il peut arriver deux cas différens : le corps peut continuer indéfiniment à tourner autour de la même ligne, ce que l'on nomme *axe de rotation permanent ;* ou bien l'axe de rotation peut changer successivement dans le corps qui tourne, jusqu'à ce qu'il se fixe dans une direction nouvelle; on dit alors que l'axe de rotation est *instantané.*

6° Il est des conditions qui déterminent la permanence de l'axe de rotation. En effet, on conçoit que, pour produire cette permanence, il est nécessaire que toutes les particules situées de l'un et de l'autre côté de l'axe prennent, en tournant, des forces centrifuges égales ; sans quoi ces nouvelles puissances, ne se faisant pas équilibre, dérangeraient bientôt la direction de l'axe de rotation. Or cette égalité de forces centrifuges ne peut exister qu'autant que les particules sont situées symétriquement à des distances égales de rotation, distances qui déterminent l'égalité des vitesses, et par conséquent celle des forces centrifuges. Il est facile de conclure des précédens raisonnemens qu'un corps solide présente toujours trois directions passant par le centre de gravité autour desquelles les forces centrifuges sont égales, et qui pourront devenir des axes *permanens* de rotation.

On conçoit aussi que les corps symétriques pourront avoir un beaucoup plus grand nombre d'axes de rotation fixes. C'est ainsi que pour la sphère tous les diamètres remplissent cette condition, tandis que pour un ellipsoïde de révolution, l'axe de révolution et tous les diamètres perpendiculaires à cet axe sont des axes de rotation fixe.

Ces propositions un peu abstraites deviendront claires en les appliquant à des surfaces tournant autour d'une ligne.

Le cercle (*fig.* 46) pourra tourner constamment autour

des lignes A B, C D, ou tout autre de ses diamètres, puisque de chaque côté de chacun de ces diamètres il se trouvera toujours deux demi-circonférences parfaitement égales.

L'ellipse (*fig.* 47) pourra tourner constamment autour des diamètres AB et CD; mais l'axe oblique EF ne pourra devenir un axe de rotation fixe; car les forces centrifuges qui s'établiront à l'extrémité des lignes *a b*, *c d*, concourront à déplacer cet axe jusqu'à ce qu'elles l'aient amené dans la direction A B, attendu qu'en opposition à la force centrifuge qui agit au bout de la ligne *a b*, il s'en trouve une beaucoup plus faible qui agit au point *e*, comme, en opposition à la force centrifuge qui s'établit au point *d*, il s'en établit une beaucoup plus faible au point *f*, tandis que pour la ligne AB toutes les forces centrifuges opposées sont égales. On déduit encore de l'inspection de cette figure que le mouvement de rotation est stable quand les momens des forces centrifuges sont un *maximum* ou un *minimum*; le *maximum* ayant lieu quand la rotation se fait autour du petit axe, et le *minimum* quand elle se fait autour du grand.

7° Un corps peut prendre momentanément un mouvement de rotation autour d'un axe qui ne doit pas rester permanent, et qu'on appelle *instantané*. Pour concevoir cet effet, supposons une ligne pesante AB (*fig.* 48); imaginons qu'au point A soit appliquée une force AD capable d'imprimer à ce point une vitesse mesurée par cette ligne elle-même; et supposons qu'au point B soit appliquée une force opposée capable d'imprimer à ce point une vitesse double exprimée par la ligne BE. Il est évident que le mouvement de la ligne pesante ne pourra avoir lieu qu'autour d'un point, lequel sera le point C, dont les distances aux points A et B seront proportionnelles aux vitesses des deux

forces; mais ce point C n'étant pas le centre de gravité de la ligne A B, si les deux forces AD et BE cessent d'agir, les forces centrifuges C B l'emporteront sur les forces centrifuges C A, et déplaceront le centre de gravité dans l'espace, jusqu'à ce que la rotation s'établisse autour du point C' (milieu de AB), auquel cas ce point deviendra un centre permanent de rotation, et cette rotation continuera indéfiniment. C'est ce qui arrive à un bâton lancé en tournant dans l'espace : la main lui imprime d'abord un mouvement de rotation autour de l'une de ses extrémités; mais il finit bientôt par tourner autour du milieu de sa longueur. Des effets analogues arrivent à tous les corps solides qui commencent par tourner autour d'un axe instantané.

8° Lorsqu'un corps circule autour d'un axe permanent de rotation, les déplacemens de totalité que ce corps peut éprouver dans l'espace ne changent en rien la direction de l'axe, et toutes les impulsions nouvelles qu'il peut recevoir ne sauraient non plus déranger cet axe, pourvu qu'elles passent par le centre de gravité. C'est ainsi que deux billes qui se choquent en tournant continuent à tourner dans le même sens, quoiqu'elles se meuvent, après leur choc, dans des directions opposées.

143. Les mouvemens des planètes offrent de grands exemples des circonstances et des lois que nous venons d'exposer. Ainsi la terre est un sphéroïde qui tourne sur un axe de rotation permanant parce que le moment des forces centrifuges est un *maximum*, la rotation se faisant sur le petit axe du sphéroïde. L'attraction que le soleil et les planètes exercent sur elle ne dérangerait en rien la situation de cet axe, si la terre était sphérique, mais comme la résultante de toutes les puissances d'attraction ne passe pas toujours par le même point du globe, dans les différens rapports de situation de la terre avec le soleil et les autres

corps célestes, l'axe de rotation de la terre, qui est toujours le même par rapport à s· masse, éprouve de légers déplacemens par rapport aux étoiles fixes; c'est ce qu'on nomme *nutation* de l'axe de la terre.

A part le cas des planètes, il est très peu d'exemples de corps solides libres que l'on puisse choisir pour confirmer les lois précédentes, attendu que la pesanteur, sollicitant tous les corps, vient toujours compliquer les phénomènes; cependant en détruisant la pesanteur par une simple suspension, on obtient quelques résultats sensibles.

Soit, par exemple, le plan A B (*fig.* 49) situé horizontalement et suspendu par son centre au moyen d'un fil C F. Si on lui imprime une impulsion dans la direction A B, qui passe par son centre de gravité ou d'inertie, il se mouvra sans rotation; si l'impulsion est donnée suivant la direction A′B′, qui ne passe pas par le centre de gravité, le plan exécutera un mouvement de translation et tournera en même temps autour du point C comme centre.

Si l'on place une masse pesante auprès de la circonférence du cercle, celui-ci ne pourra plus tourner autour du point C comme centre, mais bien autour du point C′, et le fil de suspension devra être placé en C′F′. Dans cet état, le mouvement de rotation du plan paraîtra extrêmement irrégulier, attendu la différence de longueur des lignes C′A et C′B; mais il n'en sera pas moins permanent autour du point C′.

Il existe un fait vulgaire qui rend très sensible l'existence, la situation et les déplacemens des axes de rotation: c'est celui où des corps pesans tournent avec rapidité sur un pivot qui repose sur une surface unie; les tontons, les toupies, les sabots, qui servent de jouets aux enfans, présentent ces dispositions. Ces petits instrumens sont symétriques autour d'un axe de rotation verticale; cet axe de

rotation présente ordinairement un *minimum* des forces centrifuges, aussi est-il permanent et se replace-t-il toujours dans la verticale malgré les chocs ou les dérangemens que la machine peut éprouver en tournant. On peut toujours disposer un corps solide régulier de manière à pouvoir le faire pirouetter sur ses trois axes principaux : si deux corps de cette espèce, tournant avec beaucoup de vélocité, viennent à s'entrechoquer, ils se repoussent avec une grande violence, se déplacent tous deux rapidement dans l'espace; mais l'axe de rotation n'est pas dérangé et se meut parallélement à lui-même. On peut, à l'aide de ces instrumens simples, répéter beaucoup d'expériences propres à éclaircir la question qui nous occupe.

Une circonstance remarquable, c'est que, dans un de ces corps tournans quelconques, il arrive presque toujours ou que la forme n'est pas régulière, ou que la densité n'est pas uniforme; en sorte qu'ils ne seraient pas en équilibre si on les posait verticalement et sur leur pointe. Et d'ailleurs fussent-ils réguliers et homogènes, cet équilibre serait du genre de ceux que nous avons appelés non stables; tandis qu'animés d'un mouvement rapide de rotation, tous ces corps persistent dans la position verticale, malgré d'assez grands efforts que l'on tenterait pour les renverser. On conçoit ce phénomène en considérant, 1° qu'en supposant que le corps fût plus pesant d'un côté que de l'autre, il devrait tomber de ce côté, mais avec une vitesse initiale très petite, tandis que ce même point se trouve rapidement transporté du côté opposé; en sorte que l'on peut dire que le corps n'a jamais le temps de tomber ni d'un côté ni de l'autre; 2° en faisant attention que les forces centrifuges qui animent les différentes parties du corps tournant sont extrêmement considérables et ont une direction perpendiculaire à l'axe; tandis que la pesan-

teur agit presque parallèlement à ce même axe, et doit perdre beaucoup de son influence.

MOUVEMENT D'UN CORPS SOLIDE FIXÉ PAR UN POINT OU PAR UN AXE.

144. Lorsqu'un corps solide est fixé par un point, les forces se composent autour de ce point, comme nous l'avons établi (125), et il y a mouvement, si la résultante ne passe pas par le point fixe, ou si les forces se réduisent à un couple. Ce mouvement est nécessairement une rotation autour du point fixe, et les chemins parcourus, ou les vitesses des différens points du corps, sont proportionnelles à la distance où elles se trouvent d'un certain axe de rotation qui s'établit toujours, et qui passe nécessairement par le point fixe; cet axe de rotation pourrait être lui-même instantané ou permanent, s'il n'y avait réellement qu'un seul point de fixe; mais ce cas est presque idéal.

Il n'existe qu'un seul cas important de mouvement d'un corps solide fixé par un point, et c'est celui du pendule.

145. Nous avons établi les lois de l'oscillation d'un pendule supposé simple, c'est-à-dire, formé d'un seul point matériel attaché au bout d'un fil sans pesanteur, suspendu lui-même à un point fixe. Mais il est facile de concevoir que ce cas n'existe jamais en réalité, et qu'il y a toujours, dans la longueur d'un pendule, des masses matérielles situées à différentes distances du point fixe, et dont les vitesses d'oscillation sont très différentes les unes des autres. En effet, supposons (*fig.* 50) un pendule formé de deux masses A et B suspendues au point F, de façon que la longueur AF soit moitié de la longueur BF : si chaque masse pouvait osciller librement, les mouvemens de la masse A seraient beaucoup plus rapides que ceux de la

masse B. Mais si, comme il arrive dans tous les pendules matériels et solides, les masses A et B sont unies par une tige inflexible, elles seront forcées de faire leurs oscillations dans le même temps, et par conséquent la masse A sera retardée dans sa marche, et la masse B sera accélérée. En conséquence la vitesse des oscillations du pendule sera plus grande que celle de la masse B isolée, et plus petite que celle de la masse A isolée ; la longueur du pendule simple qui correspondra à la vitesse du pendule composé sera plus petite que FB et plus grande que FA ; il y aura donc entre A et B un certain point C qui marquera la longueur d'un simple pendule qui battrait dans le même temps que le pendule composé. On démontre que le point C, qu'on appelle *centre d'oscillation* du pendule composé, est toujours placé au dessous du centre de gravité de ce pendule.

Les géomètres ont trouvé des formules générales à l'aide desquelles on peut toujours déterminer la longueur d'un pendule simple correspondant à un pendule composé dont on connaît le poids et la figure.

Si l'on suppose d'abord que des masses A et B soient placées sur la longueur du pendule, et qu'elles ne présentent pas elles-mêmes de volumes sensibles, on trouve la formule $x=\frac{Aa^2 \times Bb^2}{Aa \times Bb}$; x est la longueur cherchée du pendule simple, A l'une des masses, a sa distance au point de suspension, B l'autre masse, b sa distance au point de suspension ; c'est-à-dire, qu'il faut multiplier chaque masse par le carré de sa distance au point de suspension, ajouter ces produits et diviser par la somme des produits des masses par leurs distances au point de suspension.

On obtient encore une formule plus générale que la

précédente, et qui donne $x=\frac{a^2+k^2}{a}$; x est toujours la longueur cherchée, a est la distance qui se trouve entre le centre de gravité de la masse du pendule et son centre de suspension; k^2 est l'expression de ce que l'on nomme *moment d'inertie* de la masse autour d'un axe de rotation passant par le centre de gravité et le point de suspension, divisé par la masse. Ce moment d'inertie s'obtient en multipliant chaque partie de la masse commune par le carré de sa distance à l'axe de rotation.

On voit que dans la première formule chaque partie de la masse est considérée à part et relativement à sa distance au point de suspension, sans parler du centre de gravité commun de ces masses. Dans la seconde, au contraire, on fait usage et du centre de gravité et de sa distance au point de suspension. C'est pourquoi il est devenu nécessaire d'y introduire l'expression du moment d'inertie de toutes les particules matérielles relativement au centre de gravité.

On peut, pour en démontrer l'exactitude et l'accord, essayer dans des suppositions très simples l'application de ces formules à la détermination de la longueur du pendule simple correspondant à un pendule composé. Soit toujours (*fig.* 50) le pendule formé de deux masses qui n'ont pas de volume. Supposons la longueur FB égale à 12, la longueur FA égale à 6, la masse A égale à 3, la masse B égale à 3. Dans la première formule

$x=\frac{Aa^2+Bb^2}{Aa+Bb}$, a égale 6, b égale 12; on a donc

$x=\frac{3\times36+3\times144}{3\times6+3\times12}=10$. En appliquant l'autre formule, il faut d'abord chercher la valeur de k^2, c'est-à-dire multiplier les deux masses A et B chacune par le carré de leur

distance au centre de gravité, qui est 3, ce qui donne $3\times9=27$, plus $3\times9=27$ ou 54, qu'il faut diviser par la masse totale égale à 6, ce qui donne k^2 égale à 9. Prenant maintenant la formule $x=\frac{a^2+k^2}{a}$, dans laquelle a représente la distance du centre de gravité au point de suspension qui est ici égale à 9, on a $x=\frac{81+9}{9}=10$.

L'application que nous venons de faire est en quelque sorte idéale, puisque deux masses A et B auront toujours un volume quelconque, et puisque tous les pendules composés ont un volume considérable. Lorsqu'il est question d'un semblable corps de poids et de volume déterminés, il est nécessaire de considérer d'abord toutes les particules matérielles, ainsi que leur distance à l'axe qui passe par le centre de gravité; mais il faut ensuite faire usage du calcul intégral pour ramener les formules à des expressions qui ne contiennent plus que des valeurs susceptibles de mesure dans le solide même auquel on a affaire. On a trouvé par ces méthodes que le centre d'oscillation d'un cylindre régulier et homogène suspendu par une extrémité est placé à l'endroit où les deux tiers supérieurs du cylindre se réunissent au tiers inférieur, et que si ce même cylindre était suspendu par ce centre même d'oscillation, son extrémité deviendrait le centre nouveau d'oscillation.

On a trouvé par les mêmes méthodes que le centre d'oscillation d'un triangle isocèle suspendu par son sommet est aux trois quarts de sa hauteur, et que celui d'un cercle est aux trois quarts de son diamètre.

Le centre d'oscillation d'une sphère suspendue à un fil est à une distance du point de suspension égale à $l+\frac{2r}{5l}$,

l étant la distance du centre de la sphère au point de suspension, et r le rayon de cette sphère.

146. Avec quelque exactitude que l'on ait déterminé, soit par le calcul, soit par des expériences comparatives directes, les longueurs et la durée des oscillations d'un pendule composé, cet instrument peut être affecté d'un certain nombre d'irrégularités qu'il importe beaucoup de prévenir. En premier lieu, les oscillations doivent être très petites et toujours de la même amplitude, puisque nous avons vu que les grands arcs étaient parcourus un peu plus lentement que les petits. Bernouilli avait imaginé, pour assurer l'isochronisme, de faire osciller le pendule entre deux petits arcs de cycloïde, en le suspendant à une lame élastique qui pût se plier sur ces arcs; mais ce moyen a été abandonné comme difficile d'exécution et à peu près superflu, quand les amplitudes ne varient pas.

En second lieu, la résistance de l'air doit détruire peu à peu le mouvement du pendule, et l'horloge à laquelle on l'adapte doit employer une partie de sa puissance à entretenir ce mouvement. Pour diminuer autant que possible et cette perte et l'emploi de la force qui la répare, on rend le pendule extrêmement pesant, et on lui donne la forme d'une lentille, dont les bords tranchans éprouvent très peu de résistance de la part de l'air. On doit, du reste, soustraire l'instrument à toute influence des agitations atmosphériques.

Enfin, et cette dernière cause de perturbation est plus importante que toutes les autres, les variations de température, en alongeant ou en raccourcissant la tige métallique qui suspend la lentille, apporteraient des inégalités dans la durée des oscillations. On a imaginé un grand nombre de moyens pour obvier à cet inconvénient. Les uns ont fait entrer dans la composition du pendule une

colonne de mercure, qui s'élevait en se dilatant, et compensait ainsi l'alongement de la tige métallique. D'autres ont pensé qu'une tige de bois bien sec et verni n'éprouverait pas de changemens sensibles dans ses dimensions. Mais le moyen le plus usité consiste à opposer la dilatation d'un métal à celle d'un autre pour produire une compensation. On y réussit par le genre de construction indiqué dans la *fig.* 51. Au lieu d'une tige métallique simple, la lentille *o* est suspendue par une combinaison de tringles métalliques, les unes en cuivre et les autres en acier, disposées de manière à ce que la dilatation du cuivre, qui peut être évaluée à 5, détruise les effets de la dilatation de l'acier, qui peut être évaluée à 3. En effet, la tige *a b* du pendule est en acier; elle passe librement par un trou pratiqué dans la traverse *e g*, et va se fixer à la petite traverse *k h*, qui est elle-même supportée par les deux tringles *k l*, *h i*, qui sont en cuivre. Le tout est suspendu par les deux tringles *d e*, *f g*, qui sont en acier, et qui se fixent à la traverse *d f*, qui porte le point de suspension; en sorte que si l'appareil s'échauffe, les tiges d'acier *d e*, *f g* et la tige *a b* du pendule s'allongeront, ce qui fera descendre la lentille; mais en même temps les tiges *k l* et *h i* s'alongeront davantage, parce qu'elles sont en cuivre, et feront remonter le point *a* de la tige *a b*, et par conséquent la lentille.

Il ne peut pas y avoir compensation exacte dans l'appareil que nous venons de décrire, puisqu'il y a deux alongemens d'acier représentés par 6, et un alongement de cuivre représenté par 5; mais on obtient cette compensation en répétant le même effet à l'aide d'un plus grand nombre de tiges de cuivre et d'acier disposées sur le même principe.

M. Martin a imaginé un autre genre de compensateur

qui n'est pas moins ingénieux. Si l'on fixe l'une sur l'autre, par un grand nombre de vis, une lame de cuivre et une lame de fer, cette réunion prendra des courbures déterminées dans les changemens de température, puisqu'une des lames s'alongera plus que l'autre. Cela posé, si l'on place (*fig.* 52) en travers de la tige d'un pendule A B un semblable appareil *a b* chargé de deux boules métalliques à ses extrémités, lorsque l'arc se redressera les boules s'élèveront, et réciproquement. On pourra arriver par le calcul à compenser ainsi l'alongement de la tige A B, et l'on arrivera à la plus grande précision en montant sur des vis les petites masses *a b*, pour les approcher ou les éloigner du centre de mouvement, jusqu'à ce que la compensation soit parfaite. Le même moyen est employé dans les petits balanciers du chronomètre. (*Voy.* le livre intitulé Calorique.)

147. Nous avons vu (127) les conditions de l'équilibre des forces appliquées à un corps fixé par un axe. Mais si, dans un tel corps, l'équilibre vient à être rompu, toutes ces particules se mettront en mouvement; elles seront forcées de décrire des cercles autour de l'axe (les rayons de ces cercles seront déterminés par les distances perpendiculaires des molécules à l'axe, et par conséquent chaque molécule prendra une vitesse différente et relative à sa situation. Ces vitesses différentes produiront elles-mêmes dans chaque molécule une force centrifuge proportionnelle dont le *maximum* appartiendra aux molécules qui décrivent les plus grands cercles, et le *minimum* à celles qui sont situées le plus près de l'axe. Il existe une multitude de cas dans lesquels tous ces effets sont produits, sans qu'il soit fort important de les apprécier. Il en est quelques uns dans lesquels leur appréciation devient intéressante. La masse générale du globe terrestre est précisément dans le cas que

nous venons d'indiquer; mais il paraît que cette masse n'a pas toujours été dans l'état de solidité où nous la voyons, ou bien qu'actuellement même elle n'est pas aussi solide qu'elle le paraît, puisque le mouvement de rotation a produit en elle un changement de figure en augmentant le diamètre de l'équateur, et en diminuant celui qui passe par les pôles.

On démontre par une expérience ingénieuse la nature de cet effet du mouvement de rotation : on dispose sur un axe deux cercles élastiques très flexibles qui se croisent à angle droit; on place sur l'axe et au dedans des cercles deux anneaux mobiles, et on imprime un mouvement de rotation rapide à toute la machine. Pendant ce mouvement les deux cercles prennent une forme elliptique, et le diamètre qui répond à l'axe est diminué, ce dont on a la preuve et la mesure par la situation des deux anneaux mobiles qui, après l'expérience, se trouvent placés plus près l'un de l'autre, et à une certaine distance des cercles revenus à leur figure naturelle.

On a imaginé plusieurs autres machines propres à rendre sensibles les effets de la rotation sur un axe. On place sur une barre horizontale qui peut tourner sur son centre avec rapidité les corps que l'on veut soumettre aux expériences.

a. La barre horizontale supporte un fil métallique par lequel sont enfilées des boules d'ivoire de différens poids : si l'on en place une seule de manière que son centre réponde à l'axe de rotation, elle reste en repos, parce que la résultante de toutes ses forces centrifuges est égale à zéro. Deux boules égales, enchaînées par un fil, et placées à d'égales distances du point de rotation, demeurent en repos, parce que leurs forces centrifuges se font équilibre.

Deux boules inégales enchaînées par un fil et placées à

des distances du centre réciproquement proportionnelles à leurs masses restent en repos, car leurs forces centrifuges se font encore équilibre, les vitesses compensant les masses. Dans tout autre cas, les boules sont portées avec rapidité vers l'extrémité de la tige tournante.

b. Si l'on remplace le fil portant des boules par deux tubes de verre inclinés vers le centre de l'appareil, si l'un des tubes contient de l'eau et une balle de plomb, et l'autre de l'eau et une balle de liége : dans l'état de repos, la balle de plomb sera au bas de son tube, et la balle de liége au sommet de son tube. Dans l'état de rotation rapide, la balle de plomb montera au sommet du tube et la balle de liége descendra au centre; car la force centrifuge l'emportera alors sur les effets de la pesanteur; l'excès de poids spécifique du plomb sur celui de l'eau portera la balle de plomb en dehors de ce liquide; l'excès du poids spécifique de l'eau sur celui du liége portera l'eau en dehors et laissera le liége au centre.

c. Des phénomènes du même ordre arriveront si l'on remplit les tubes de mercure, d'eau et d'air : ces trois corps se rangeront, dans l'état de repos, dans l'ordre naturel de leur poids spécifique; pendant la rotation, cet ordre sera renversé.

On a proposé l'application d'un procédé fondé sur ces principes pour remédier aux congestions de sang qui se forment vers le cerveau, et qu'on désigne sous le nom d'*apoplexies;* et on a imaginé de placer le malade sur une machine de rotation, la tête vers le centre et les pieds du côté de la circonférence. Il n'est pas douteux que dans le mouvement de rotation le sang ne dût alors se porter avec force vers l'extrémité la plus éloignée du centre de mouvement; mais il est très probable qu'à l'instant où le mouvement cesserait, les fluides retourneraient vers la tête

avec une violence qui pourrait déterminer des accidens encore plus graves que ceux auxquels on cherche à remédier. Ce moyen a été soumis à quelques expériences à la Salpêtrière pour le traitement des aliénés, mais d'une manière trop peu méthodique pour en rien conclure.

DU CHOC DES CORPS SOLIDES.

148. Lorsque deux corps solides, animés de mouvemens divers, viennent à se rencontrer dans l'espace, il en résulte ce qu'on appelle un *choc* : et dans ce choc les mouvemens dont les corps étaient animés se trouvent détruits, transmis d'un corps à l'autre, ou modifiés dans leur intensité et leur direction, le tout suivant des lois fort importantes à déterminer et à connaître, mais avec des circonstances tellement multipliées et variables, qu'il est indispensable de considérer d'abord des cas très simples, et par exemple de supposer que les corps qui se choquent sont des sphères de poids connus, animées de vitesses connues et qui se rencontrent dans des directions qui passent par leur centre de gravité, ce qu'on désigne par le nom de *choc central*.

Les effets produits par le choc des corps diffèrent essentiellement suivant que les corps sont privés d'élasticité ou sont élastiques, et encore suivant que l'élasticité est parfaite ou qu'elle est incomplète. Nous examinerons successivement ces trois cas.

CHOC CENTRAL DES CORPS NON ÉLASTIQUES.

149. Pour faire les expériences qui établissent les lois du choc des corps, on se sert d'un appareil représenté (*fig.* 53), qui présente un arc de cercle, au centre duquel sont

suspendues par des fils des masses entre lesquelles on veut déterminer le choc. Ces masses représentent alors un pendule, et si on les élève le long de l'arc de cercle d'un nombre de degrés déterminé, elles auront, en arrivant à la verticale, des vitesses connues. Les degrés de cet arc doivent être mesurés par la longueur des cordes, car on sait que les vitesses acquises sont proportionnelles à ces cordes. On portera donc du point A marqué o, vers les points B et C, des longueurs de corde successivement croissantes, comme 1, 2, 3, 4, etc., et on obtiendra sur l'arc des degrés inégaux, mais qui produiront des vitesses proportionnelles aux cordes. On pourra faire varier à volonté la masse des corps qui se choqueront ; et pour représenter des corps non élastiques, on pourra se servir de boules de terre glaise humide, car tous les corps durs sont plus ou moins élastiques.

Si deux corps mous de masses égales et animés de vitesses égales et opposées viennent à se choquer, les deux corps s'aplatiront l'un sur l'autre et demeureront en repos; les puissances qui les animaient auront été absorbées par le déplacement opéré entre leurs particules, malgré la cohésion qui les fixait à leur place.

Deux corps mous de masses inégales, mais animés de vitesses réciproquement proportionnelles à leurs masses, se réduiront au repos de la même manière. Par exemple, dans la machine décrite, deux sphères pesant chacune 4, et tombant chacune de 6 degrés, s'arrêteront au zéro de l'échelle. Une des boules pesant 2 et tombant de 4 degrés, l'autre pesant 4 et tombant de 2 degrés, les deux boules s'arrêteront au zéro.

Si les quantités de mouvemens des deux corps mous sont inégales et opposées, il existera après le choc une quantité de mouvemens dans le sens de la plus grande, et qui sera

égale à leur différence. Quant à la vitesse, on l'obtiendra en divisant la quantité de mouvement par la somme des masses des deux corps.

Soit, par exemple, une masse comme 4, tombant de 6 degrés : sa quantité de mouvement sera 24. Soit l'autre masse comme 4, tombant de 2 degrés, sa quantité de mouvement sera 8 : le mouvement, après le choc, sera dans le sens de la première, et sera égal à 24, moins 8 ou 16, la masse commune sera 8, et la vitesse de cette masse sera par conséquent 2.

On vérifie, à très peu près, ce fait avec les deux boules de glaise qui remontent ensemble à 2 degrés du côté vers lequel marchait la plus forte, Il faut seulement remarquer qu'en faisant l'expérience, c'est le centre de gravité des deux boules réunies qui doit parvenir jusqu'au deuxième degré, sa situation est indiquée par le plan de contact des deux boules.

Si l'un des corps mous est en repos et l'autre en mouvement, la quantité de mouvement après le choc sera la même qu'avant ce choc; mais comme la masse sera augmentée, la vitesse devra être diminuée relativement. On trouve en effet que si les deux boules sont égales, et que l'une tombe de 6 degrés sur l'autre, elles remonteront ensemble à 3 degrés du côté opposé,

Si la masse en repos est très grande, ou présente une surface immobile, comme un plan de marbre que l'on placerait au zéro de l'échelle, le corps mou arrivera au repos en s'aplatissant sur le corps résistant, sans lui communiquer une vitesse sensible, puisque la masse, après le choc, peut être considérée comme infinie.

Lorsque deux corps mous animés de quantités de mouvement inégales, mais dans le même sens, viennent à se rencontrer, les deux quantités de mouvement s'ajoutent,

et la vitesse après le choc s'obtient en divisant cette somme par la somme des masses. Si, par exemple, une boule pesant 4 tombe de 6 degrés, et une autre boule pesant 4 tombe de 2 degrés, la quantité de mouvement après le choc sera 24+8 ou 32, et la vitesse sera 32 divisé par 8 ou 4.

On exprime par une seule formule générale toutes les vitesses qui peuvent résulter de ces différentes circonstances. Si l'on nomme u la vitesse après le choc, m la masse d'un corps, m' la masse de l'autre, v et v' leurs vitesses réciproques, comme la quantité de mouvement après le choc doit être égale à la différence des quantités de mouvement avant le choc, dans le cas de mouvemens opposés, on aura $(m+m')\,u=mv-m'v'$, d'où l'on tire $u=\frac{mv-m'v'}{m+m'}$, valeur de u, qui s'applique à tous les cas indiqués. Mais si les corps se meuvent dans le même sens, la quantité de mouvement sera égale à la somme de celles qui existaient avant le choc. On aura donc $(m+m')\,u=mv+m'v'$, d'où l'on tire $u=\frac{mv+m'v'}{m+m'}$; ainsi $u=\frac{mv\pm m'v'}{m+m'}$ est la formule qui s'applique à tous les cas où deux corps mous se rencontrent en se mouvant dans le même sens ou en sens contraire.

On conçoit que dans le cas où l'une des masses est en repos, la formule se réduit à $u=\frac{mv}{m+m'}$, et que dans le cas où la masse choquée est infinie, le diviseur $m+m'$ étant infini, u est infiniment petit ou égale zéro.

CHOC EXCENTRIQUE DES CORPS MOUS.

150. Si un corps mou vient à frapper obliquement sur un plan, son mouvement doit être décomposé en deux forces, l'une perpendiculaire et l'autre parallèle à la direction du plan. La première sera détruite par la résistance du plan; la seconde tendra à mouvoir le corps le long de ce plan. Dans ce cas, une sphère molle pourra rouler sur le plan après l'avoir rencontré; ou si elle adhère au point de contact, elle se déformera en s'allongeant dans la direction du mouvement qui lui reste, jusqu'à ce que ce mouvement soit épuisé par le déplacement réciproque de ses particules.

Si des sphères molles se rencontrent dans des directions obliques, le mouvement de chacune d'elles pourra toujours se décomposer en deux forces, dont l'une sera détruite par le choc, et dont l'autre se composera avec celle du corps opposé, pour mouvoir la masse commune dans une diagonale.

On a pu remarquer, dans tout ce que nous venons de dire sur le choc des corps mous, qu'il y a très souvent une perte considérable de mouvement dans ce choc, et qu'il est même quelquefois réduit à zéro, ce qui semble contraire à ce que nous avons dit du mouvement en général. Mais il faut remarquer que des mouvements contraires doivent se détruire. C'est ce qui arrive dans les corps mous animés de mouvemens opposés : la quantité de mouvement après le choc est égale à la différence des quantités de mouvement avant le choc, et ce qui paraît perdu a souvent été employé à changer la forme du corps, Aussi, dit-on, comme axiome général de mécanique, que, dans les chocs

quelconques des corps mous ou imparfaitement élastiques, il y a toujours diminution des *forces vives.*

CHOC CENTRAL DES CORPS ÉLASTIQUES.

151. Si l'on se rappelle ce que nous avons dit (107) de élasticité des corps solides, il sera facile de concevoir que ette propriété doit apporter des changemens très considérables dans les effets du choc des corps, puisque dans le moment même où leurs molécules auront été déplacées par les effets du choc, au lieu de rester, comme pour les corps mous, dans cet état de déplacement, elles reviendront subitement à leur position première, et pourront même la dépasser d'une certaine quantité pour se livrer ensuite à des oscillations successivement décroissantes jusqu'à l'état de repos. On voit donc qu'au moment du choc les centres de gravité de deux corps solides élastiques peuvent se trouver placés plus près l'un de l'autre que la figure de ces corps ne le permettait dans l'état ordinaire, tandis que dans l'instant suivant les corps reprenant leur première dimension, et même un plus grand diamètre dans la direction du choc, les deux centres de gravité doivent être écartés l'un de l'autre avec une force qui sera exactement proportionnelle à l'intensité du choc, si les corps sont parfaitement élastiques; et comme ces corps cesseront de se toucher à l'instant même où la répulsion commencera, les vibrations consécutives n'auront aucune influence sur le phénomène, qui se passe tout entier dans la première de ces oscillations.

Si les corps qui se choquent employaient un temps plus ou moins considérable pour revenir à leur forme première, les résultats du choc seraient tout à fait différens. Nous ne parlons ici que de l'élasticité parfaite, c'est-à-dire dans laquelle le retour est complet et instantané.

On prend communément pour exemple des corps élastiques, des boules d'ivoire qui présentent les deux avantages indiqués, et qui en outre ne sont point fragiles.

Si deux masses élastiques égales et animées de vitesses égales viennent à se choquer, elles se comprimeront d'abord réciproquement; et, revenant aussitôt à leur forme première, se repousseront avec une force égale à la compression; elles retourneront par conséquent, dans le sens contraire à la direction primitive de leur mouvement, avec des vitesses précisément égales à celles qui les animaient au moment du choc. Si l'expérience se fait avec la machine décrite (149), deux billes d'ivoire égales, tombant chacune de six degrés, par exemple, remonteront chacune à six degrés.

Si les deux corps élastiques, ayant des masses égales, ont des vitesses différentes, elles se trouveront, après le choc, avoir échangé leurs vitesses, Si, par exemple, la bille A est tombée de 10 degrés, et la bille B de 6, après le choc la bille A remontera de 6 degrés, et la bille B de 10. Pour concevoir ce phénomène, il faut se rappeler ce que nous avons dit (149) du choc des corps mous et décomposer en quelque sorte le phénomène du choc des corps élastiques. En effet, au moment où les corps A et B se choquent et se compriment, la vitesse 6 du corps B doit détruire 6 parties de la vitesse du corps A; et il reste à la bille A une vitesse comme quatre, en vertu de laquelle elle presse la bille B pour partager avec elle cette vitesse; en sorte que la double masse devrait se mouvoir ensuite avec une vitesse comme 2; et si dans ce moment l'élasticité est mise en jeu, elle produira une impulsion proportionnelle, 1° à la vitesse 6 qui a été détruite dans la bille A; 2° à la moitié de la vitesse 4, qui devait se partager aux deux billes, c'est-à-dire à 8. Les deux billes devront donc prendre en sens con-

traire des vitesses comme 8. Mais la bille A a conservé une vitesse comme 2 dans le sens primitif de son mouvement; sa vitesse deviendra donc 8—2 ou 6. Quant à la bille B, elle avait acquis une vitesse comme 2 dans le sens de la nouvelle impulsion; elle prendra donc une vitesse égale à 8+2 ou à 10, d'où l'on voit que les vitesses se seront effectivement échangées entre les deux billes.

Si, les masses étant égales, une des deux billes est en repos, il y aura encore échange de vitesses, c'est-à-dire que la bille choquante prendra une vitesse nulle ou restera en repos, tandis que la bille choquée s'emparera de toute la vitesse de la première. En effet, la bille A étant animée d'une vitesse comme 10, tendra d'abord à la partager avec la bille B, et les deux corps devraient se mouvoir ensuite avec une vitesse commune égale à 5. Mais l'élasticité produira dans les deux billes une impulsion égale à 5; la bille A ayant conservé dans le sens primitif de son mouvement une vitesse comme 5, et en recevant une égale et opposée, demeurera en repos, pendant que la bille B, ayant déjà acquis une vitesse comme 5, dans le sens de la nouvelle impulsion, prendra, dans cette direction, une vitesse comme 10.

Si le corps qui est en repos est une masse immuable, la bille qui viendra la frapper perdra d'abord la totalité de sa vitesse, et sera ensuite repoussée avec une force proportionnelle à cette vitesse; par conséquent elle en prendra une égale et opposée, ou remontera précisément d'où elle était descendue.

Si les billes élastiques qui se choquent ont des masses différentes, on trouvera, par les mêmes raisonnemens, les résultats que présente en effet l'expérience. Soit, par exemple, la bille A ayant une masse comme 1, et étant animée d'une vitesse comme 6, et supposons que la bille B,

ayant une masse comme 2, soit en repos : après le choc, la vitesse commune devrait être 2, puisqu'une vitesse comme 6 s'est partagée à une masse comme 3. La réaction élastique étant proportionnelle à la perte de vitesse, sera donc égale à 4; la bille A, à qui il restait une vitesse comme 2, et qui reçoit 4 de vitesse en sens inverse, retournera sur ses pas avec une vitesse comme 2, et la bille B, qui avait déjà une vitesse comme 2, recevant l'impulsion d'une vitesse comme 4, qui se partage à une masse double, ne recevra en effet qu'une vitesse comme 2, qui, s'ajoutant avec celle qu'elle avait déjà, la mettra en mouvement avec une vitesse comme 4.

Si les deux corps élastiques se mouvaient dans le même sens avec des vitesses inégales et venaient à se rencontrer, il y aurait encore échange de vitesse entre les deux corps. En effet, si la bille A a 10 degrés de vitesse, et la bille B 6 degrés, la vitesse commune, après le contact, sera la moitié de la somme de ces vitesses ou 8; mais la force élastique sera égale à la vitesse perdue ou à 2. En conséquence, la bille A prendra une vitesse égale à 8 — 2, ou à 6, et la bille B une vitesse égale à 8 + 2, ou à 10.

Il existe un cas très particulier du choc des corps élastiques, dans lequel il semble que des vitesses égales soient produites dans une même masse, par la communication de quantités de mouvement très différentes.

Supposons qu'une bille A soit en repos, et qu'elle soit frappée par une bille B, d'une masse égale et animée d'une vitesse comme 6. On a vu que la bille en repos prendra une vitesse égale à 6; mais on se demande ce qui arriverait si la bille B avait une masse double, triple, ou quadruple; on serait porté à croire que la bille A prendrait une vitesse d'autant plus grande que la quantité de mouvement de la bille choquante serait plus considérable, et cependant il

n'en est rien ; la bille A ne prendra jamais dans aucun cas une vitesse plus grande que celle de la bille B. On concevra facilement cette anomalie apparente, en considérant que la communication de mouvement d'un corps à un autre exige un temps qui, quoique très court, a pourtant une durée divisible ; en second lieu, que la quantité de mouvement de la bille B se transmettra à la bille A jusqu'à ce que celle-ci ait pris une vitesse égale à la sienne, et qu'à dater de ce moment il ne pourra plus y avoir de pression, et par conséquent de communication de mouvement d'un corps à l'autre.

Il résulte de ces observations que sur un billard de marbre, un marteau deux fois plus lourd ne donne pas plus de vitesse à une bille, qu'un marteau qui n'a que le poids de la bille.

Que sur un billard ordinaire, une queue plus lourde n'imprime pas une plus grande vitesse à la bille du joueur.

Qu'une raquette de paume ne renvoie pas la balle avec plus de vitesse quand elle est plus pesante.

On peut remarquer, au contraire, que la vitesse de la bille et celle de la balle de paume dépendent uniquement de celle avec laquelle la queue ou la raquette les rencontre ; or, comme il est plus facile à nos organes musculaires d'imprimer une grande vitesse à des corps légers qu'à des corps pesans, les queues et les raquettes légères seront les instrumens les plus propres à lancer avec vitesse des billes ou des balles.

CHOC EXCENTRIQUE DES CORPS ÉLASTIQUES.

152. Lorsque des corps élastiques se choquent dans des directions qui ne passent pas par leur centre de gravité,

il peut arriver une foule de cas de mouvemens. Et, en général, le corps qui n'est pas choqué dans la direction de son centre de gravité prend à la fois un mouvement de translation et un mouvement de rotation : l'impulsion se décompose toujours en deux forces, dont l'une est dans la direction de ce centre de gravité, et l'autre est perpendiculaire à cette direction. Mais il est un cas particulier qu'il est important d'examiner, parce qu'il s'applique à tous les phénomènes qu'on nomme *réflexions* ; c'est celui où une bille élastique vient à frapper obliquement sur un plan résistant. Soit, par exemple (*fig.* 54), le plan A B, sur lequel la bille C est lancée pour le rencontrer au point P : nous disons que cette bille sera réfléchie dans la direction P C' en faisant l'angle C P B égal à l'angle C' P A, c'est-à-dire, *l'angle d'incidence égal à l'angle de réflexion*; car ce sont les noms qu'on leur donne. Pour le démontrer, il faut considérer qu'au moment où le corps C vient à toucher le point P, sa force d'impulsion se décompose en deux autres forces, savoir : P R perpendiculaire au plan, et qui est détruite par la résistance, et P A suivant la direction du plan, et en vertu de laquelle le corps roulerait sur ce plan, s'il n'était point élastique. Mais, au moment du choc, l'élasticité produira une puissance P Q égale et opposée à la force perdue P R; le corps se trouvera donc sollicité à la fois par les forces P A et P Q, et devra parcourir la diagonale P C'. Or, à cause de l'égalité des parallélogrammes P Q C' A et P A O R, P C' sera égale à P O, et l'angle C P B sera égal à l'angle C' P A.

Si la surface sur laquelle tombe le corps élastique était courbe, les mêmes raisonnemens s'appliqueraient au plan tangent mené par le point de la surface où se ferait le choc.

Toutes les lois que nous venons d'exposer sur le choc central ou excentrique des corps élastiques sphériques,

trouvent des applications fort intéressantes dans le mouvement des billes sur un billard. On se sert, dans les cabinets de physique, d'un billard de marbre ; mais on observe alors une foule d'anomalies très curieuses, qui dépendent de ce que les billes, en recevant un mouvement de translation sur ce billard, prennent en même temps un mouvement de rotation sur un de leurs axes ; en sorte qu'après les chocs qui changent les directions des mouvemens de translation suivant les lois que nous avons établies, les billes conservent pendant un certain temps un mouvement de rotation autour de l'axe primitif, de telle façon qu'après leur réflexion sur les bandes, par exemple, au lieu de se mouvoir en ligne droite, elles décrivent des courbes qui sont le résultat de la combinaison du mouvement réfléchi avec la rotation, qui prend son point d'appui sur le plan du billard. C'est pour éviter ces inconvéniens que les billards ordinaires sont couverts en drap, et que leurs bandes ont un certain degré de mollesse. Dans ce cas, le choc enfonce, pour ainsi dire, les billes dans une concavité qui se forme à la bande, et le frottement considérable qui s'établit détruit presque complètement le mouvement de rotation de la bille.

Le jeu de billard qui peut fournir un si grand nombre d'exemples propres à éclaircir le problème du choc des corps, offre particulièrement, depuis quelques années, un genre de perfectionnement fait pour exciter la curiosité du physicien et digne de toute son attention. Ce perfectionnement consiste dans l'usage de ce que l'on appelle *queue à procédé* : autrefois on se servait exclusivement de queues en bois dont l'extrémité était pleine et perpendiculaire à l'axe de la queue ; aujourd'hui cette extrémité est garnie d'un morceau de buffle, souple, arrondi, et frotté de blanc d'Espagne ; à l'aide de cette queue et d'impulsions habi-

lement dirigées, on fait exécuter aux billes, sur un billard ordinaire, des mouvemens insolites et variés, suivant l'intérêt du joueur.

Sans entrer dans le détail, fort curieux d'ailleurs, de ces différens phénomènes, nous donnerons seulement une idée de leur théorie, en choisissant les cas les plus simples.

Si une bille, que nous nommerons A, est lancée par l'impulsion modérée d'une queue de bois, contre une autre bille B d'un poids égal, et que le choc ait lieu suivant la ligne qui joint les centres, il semblerait, d'après les principes que nous avons posés (150), que la bille A dût s'arrêter au moment du choc; il n'en arrive pourtant pas ainsi, et la bille A continue à se mouvoir encore quelque temps après avoir frappé la bille B. Cet effet tient à ce que dans le moment où la bille A s'est mise en mouvement par le choc de la queue, elle a éprouvé, de la part du tapis, un frottement qui a déterminé un mouvement de rotation sur un axe horizontal, perpendiculaire à la direction de la bille; or, au moment du choc des deux billes, les quantités de mouvement de leur centre dynamique se sont en effet échangées (151), mais le mouvement de rotation de la bille A sur son axe n'est ni détruit, ni changé (142), de sorte que le frottement du tapis qui, tout à l'heure, avait ajouté un mouvement de rotation à celui de translation, ajoute maintenant un mouvement de translation à celui de rotation qui subsiste après le choc.

En réfléchissant à la circonstance que nous venons d'exposer, l'on concevra que les mouvemens d'une bille après en avoir frappé une autre, dépendent entièrement de l'état de rotation dans lequel elle se trouve à l'instant du choc.

Cela posé, pour obtenir des modifications importantes dans les mouvemens subséquens d'une bille qui en a frappé

une autre, il suffit d'avoir un moyen de lui imprimer à volonté des mouvemens de rotation différens de celui qu'elle prendrait naturellement par une impulsion ordinaire ; et d'abord, si la bille A est voisine de la bille B, il suffira de la lancer avec beaucoup de force pour qu'elle glisse sur le tapis, sans contracter de mouvement de rotation, en sorte qu'après avoir frappé la bille B, elle demeurera immobile à sa place.

La queue *à procédé* permet des modifications bien plus remarquables : son extrémité étant convexe, permet de frapper la bille au dessus, au dessous, à droite ou à gauche de son centre dynamique; et la surface de la peau frottée de craie étant très rude, ne glisse pas sur l'ivoire de la bille et l'oblige à tourner en même temps qu'elle la déplace.

Si l'impulsion a été donnée au dessus du centre de gravité, la bille, en partant, aura déjà une vitesse de rotation dans le sens de celle qui serait naturellement produite par le frottement du tapis, par conséquent elle se mouvra longtemps encore après avoir frappé la bille B.

Si l'impulsion a été donnée au dessous du niveau du centre de gravité, la bille sera douée en partant d'un mouvement de rotation contraire à celui que le frottement du tapis tend à produire en elle, de sorte qu'au moment du choc, non seulement elle ne continuera pas à marcher dans la même direction, mais encore elle pourra revenir sur ses pas, après avoir frappé la bille B.

Lorsque deux billes se rencontrent suivant des directions qui ne passent pas par leur centre dynamique, elles se réfléchissent suivant des lois que nous avons déterminées (152); mais sur un billard garni de drap, les phénomènes sont encore modifiés dans ce cas par les mouvemens de rotation : en effet, lorsque la bille A frappe obliquement la bille B, la direction linéaire de son mouvement est chan-

gée par le choc, mais elle continue à tourner sur le même axe (142), jusqu'à ce que le mouvement du tapis ait déterminé un nouveau mode de rotation sur un nouvel axe: on sent que la direction du mouvement réfléchi formant un angle avec celle du déplacement que la rotation tend à produire, et cette dernière s'éteignant bientôt, il doit en résulter un mouvement en partie curviligne, et qui n'est pas exactement dans la direction de l'angle de réflexion.

S'il en est ainsi, on peut prévoir qu'en frappant la bille avec une queue à procédé, un peu à droite ou à gauche du centre de gravité, on lui imprimera des mouvemens de rotation sur des axes obliques, lesquels modifieront à volonté, et d'une manière très importante, les effets de la réflexion d'une bille sur l'autre; il est possible par de semblables artifices, de faire en sorte que la bille du joueur ayant frappé d'abord la bille la plus éloignée de lui, revienne toucher celle qui en est la plus voisine, ce qui semblerait contraire à toutes les lois de la mécanique, sans la théorie dont nous venons d'essayer de donner une idée.

CHOC DES CORPS ÉLASTIQUES D'UNE FORME QUELCONQUE.

153. Dans le choc réciproque des corps élastiques d'une forme quelconque il faut considérer, 1° si la direction du choc passe par le centre de gravité; 2° quelle est la direction de la surface choquée par rapport à la ligne qui passe par le centre de gravité.

Si le choc a lieu dans la direction qui passe par le centre de gravité, et si la surface choquée est perpendiculaire à cette direction, ou présente une courbe dont cette direction soit la normale, les choses se passent suivant les lois que nous avons établies. Si la surface choquée est inclinée à la direction du choc, la force doit être décomposée en deux

autres, dont l'une agit perpendiculairement à cette surface, et l'autre parallèlement. Si aucune de ces directions primitives ou secondaires ne passe par le centre de gravité, il se produira un mouvement de rotation, en même temps qu'un mouvement de translation, qui pourra être apprécié par les règles précédentes.

CHOC SIMULTANÉ DE PLUSIEURS CORPS ÉLASTIQUES.

154. Si l'on suppose (*fig.* 55) une série de billes élastiques suspendues à des fils parallèles, et situées de manière que tous leurs centres soient sur la même ligne et leurs masses égales; si dans cet état on écarte la première bille de la direction verticale, et qu'on la laisse retomber sur la seconde, la dernière bille se mettra aussitôt en mouvement; toutes les autres resteront en repos. Si l'on écarte à la fois les deux premières billes, les deux dernières se mettront en mouvement, et ainsi de suite. Mais, ce qui est plus remarquable, si dans une rangée de 8 billes on en écarte 5, après le choc 5 se mettront en mouvement, et 3 resteront en place; et si même on en écarte 7 à la fois, pour les laisser tomber sur la 8e, 7 se mettront en mouvement dans le sens opposé, et la 1re seule restera en repos. On explique ces phénomènes singuliers en admettant que les billes ne sont pas dans un contact véritable, qu'elles se choquent véritablement toutes les unes les autres, jusqu'à la bille libre qui se meut, en sorte que la première bille choque la seconde, qui reçoit tout son mouvement; que la seconde choque la troisième, lui transmet son mouvement, reste en repos, et ainsi de suite. Quant au nombre des billes qui se meuvent réellement, il est toujours égal au nombre des billes choquantes, à cause de la similitude des masses.

Si l'on range de la même manière, sur une même ligne, des billes d'ivoire dont les masses soient en progression géométrique, comme les nombres 1, 2, 4, 8, 16, etc., et si l'on écarte la plus pesante, au moment du choc, toutes les billes s'écarteront les unes des autres, et d'autant plus qu'on se rapprochera de la plus petite.

DE LA FRACTURE DES CORPS ÉLASTIQUES PAR LE CHOC.

155. Un corps solide élastique peut se briser par l'effet d'un choc, et l'on conçoit en effet que, dans le déplacement rapide des particules, elles peuvent se trouver portées à des distances réciproques qui dépassent leur sphère d'attraction, et dès lors il n'y a plus de raison pour qu'elles reviennent à leur situation première ; elles s'écartent au contraire de plus en plus les unes des autres, en obéissant à l'impulsion qu'elles ont reçue. Ce phénomène présente une infinité de circonstances variables, au milieu desquelles il est bon d'indiquer quelques cas particuliers.

Un corps solide d'un grand volume, frappé par son milieu, se brise difficilement, parce que beaucoup de molécules reçoivent et se partagent l'impulsion produite. Frappé vers un de ses angles, il se brise et s'éclate aisément, parce qu'un petit nombre de molécules recevant toute l'impulsion, se trouvent animées d'une grande vitesse.

Lorsqu'un corps mince élastique appuyé de tous points sur un plan solide est frappé dans une petite partie de son étendue, il se brise dans ce point seulement. S'il est soutenu par ses bords, il fléchit avant de se briser, et la cassure s'étend dans toutes ses parties.

Si le même corps mince et non soutenu, comme un carreau de vitre, est frappé dans un point avec une très grande vitesse, comme par une balle de fusil tirée de près,

li n'est brisé que dans le point choqué et la balle y fait un trou rond. Si le même projectile l'atteint de loin avec une impulsion médiocre, le carreau est entièrement brisé. On peut-dire que, dans le premier cas, la lame de verre n'a pas pu se fléchir; et le célèbre Charles avait l'habitude de peindre à l'imagination cet effet extraordinaire, en disant que *les molécules frappées n'avaient pas eu le temps d'avertir les autres.* On conçoit de la même manière comment une porte, mobile sur ses gonds, et que l'on peut faire mouvoir avec le bout du doigt, peut être percée par un boulet de canon et demeurer immobile.

La connaissance de ces effets d'un choc violent reçoit d'heureuses applications dans la théorie des plaies d'armes à feu. On sait que les plaies faites par les projectiles animés d'une grande vitesse sont en quelque sorte tout à fait locales, que les organes voisins n'en éprouvent presque aucun trouble, tandis que les balles mortes ou les boulets qui ont ricoché produisent d'énormes contusions ou des fractures comminutives qui sont suivies des accidens les plus graves.

Lorsqu'un corps très élastique, comme une bille de verre ou d'agate, reçoit quelque choc un peu vif, il se produit dans son intérieur de petites fêlures qui, lorsqu'on les examine, présentent cette circonstance particulière, qu'en détachant les fragmens latéraux il reste une masse conoïde dont le sommet est placé à la surface du corps précisément dans l'endroit choqué.

Les corps élastiques creux présentent en général beaucoup moins de résistance au choc que s'ils étaient pleins. Néanmoins ils offrent beaucoup plus de résistance, quand leur surface est courbe, et surtout sphérique, que quand elle est plane, la courbure offrant dans ce cas une espèce de voûte dans laquelle les particules se soutiennent les

unes les autres avec plus d'avantage. Si le corps creux est sphérique et rempli d'un liquide, les avantages de la courbure disparaissent en grande partie, et le corps se brise comme une lame plate qui serait soutenue par tous ses points.

Dans le choc imprimé à une sphère creuse, on conçoit que la fracture peut avoir lieu non seulement dans le point choqué, mais encore dans tout autre point de la sphère, et particulièrement dans le point opposé au choc, puisque nous savons que toutes les molécules d'un corps élastique sont déplacées dans ce cas, et que le diamètre d'une sphère diminue sensiblement dans la direction du choc, pour s'accroître dans les autres.

On a fait un grand abus en physiologie de l'application de la théorie des voûtes au système de résistance que peut offrir la cavité du crâne; mais elle doit être considérée comme une sphère élastique remplie d'une substance molle qui doit produire un effet analogue à celui d'un liquide. On conçoit aisément par ce mode de comparaison, les fractures directes du crâne, et les fractures qu'on nomme par *contre-coup*. On sent même que la résistance ou la solidité des parois du crâne étant très différente dans leurs diverses régions, il peut arriver souvent que le point choqué étant un des plus résistans, il ne soit pas directement fracturé, tandis qu'il se produira au même instant une fracture dans un lieu du crâne, moins résistant, particulièrement dans le point opposé à celui de la percussion ou dans le diamètre transversal.

Nous ajouterons ici, comme observation générale sur les effets du choc, que dans les manières les plus communes de le produire, avec un marteau, par exemple, on accumule dans le corps choquant, par une force accélératrice, une grande quantité de mouvement qui se transmet

dans un seul instant au corps choqué, ce qui produit des effets tout à fait différens de ceux que pourrait produire une pression même considérable. En effet, si l'on enfonce en partie un clou dans une planche de chêne, et qu'on charge la tête de ce clou d'un grand poids, il sera presque impossible de l'enfoncer ainsi plus avant dans la planche de chêne, tandis que la percussion rapide d'un très petit marteau suffira pour l'y faire pénétrer.

CHOC DES CORPS INCOMPLÈTEMENT ÉLASTIQUES.

156. Nous avons distingué un genre d'élasticité dont les effets sont instantanés, et une autre variété de la même propriété dont les effets ne s'opèrent que dans un temps plus ou moins long; nous avons rangé dans cette dernière classe l'élasticité de la gomme élastique, des cordes et des membranes tendues, des ressorts en acier, etc. Lorsque le choc a lieu entre des corps élastiques de cette espèce, les phénomènes ne suivent point, à beaucoup près, les lois que nous avons établies pour le cas où l'élasticité est complète et instantanée. En effet, si l'on emploie, dans les expériences que nous avons indiquées, des balles de gomme élastique au lieu de billes d'ivoire, les vitesses après le choc seront toujours beaucoup moindres qu'avec ces dernières. On conçoit cette différence en considérant que dans les corps parfaitement élastiques les changemens de forme sont instantanés, tandis que dans la gomme élastique, et autres corps du même genre, ils sont successifs, en sorte que les deux corps ont déjà cessé de se toucher avant que l'élasticité ait déployé toute son énergie.

Par la même raison, les effets du choc sur ces sortes de corps, ou avec leur intermédiaire, seront tout à fait différens. Si l'on frappe un morceau de fer avec un marteau

sur une enclume, à chaque coup sa forme sera modifiée; mais si l'on place une planche de liége entre l'enclume et le morceau de fer, les coups de marteau deviendront sans effet, car la quantité de mouvement dont cet instrument est animé s'éteindra peu à peu pendant la succession du temps que le liége mettra à se laisser comprimer. Cette différence devient sensible dans une foule de circonstances usuelles. C'est elle qui détruit la dureté des cahots dans nos voitures suspendues; c'est par la même raison qu'un homme peut se précipiter sans danger d'une très grande hauteur sur un amas de matières flexibles, comme du foin ou de la paille, tandis qu'il se serait fracturé la tête ou les membres en tombant de la même hauteur sur le pavé.

La nature a placé dans notre propre structure un très grand nombre de moyens de résistance au choc, qui sont fondés sur le même principe. Un homme qui saute de très haut arrive à terre les membres demi-fléchis : par l'effet du choc toutes ces flexions augmentent; mais le mouvement se détruit peu à peu en les produisant, et le choc est sans inconvénient; tandis que si le même homme eût touché la terre dans l'état de rectitude du corps et des membres, il aurait pu en résulter quelque fracture, ou du moins une violente commotion du cerveau.

La colonne vertébrale et la poitrine offrent des exemples frappans de l'usage des corps imparfaitement élastiques, pour annuler l'effet des chocs extérieurs. Les cartilages qui unissent les côtes au sternum, et les substances intervertébrales, mettent les organes à l'abri des effets d'une foule d'accidens qui seraient beaucoup moins bien prévenus par des résistances absolues que par cette flexibilité qui cède peu à peu, et ramène pourtant les cavités à leur figure première.

DU FROTTEMENT.

157. Dans toutes les circonstances où deux corps solides en contact changent de situation l'un par rapport à l'autre, et par exemple lorsqu'un corps solide glisse sur un plan, ou lorsqu'un cylindre roule sur une surface plane, il se présente un obstacle au mouvement, qui diminue toujours son intensité calculée, et qui réside évidemment dans les points de contact des deux corps. On donne à cette résistance le nom de frottement. On l'attribue à ce que les corps solides les plus polis ne le sont vraiment qu'en apparence, et présentent en effet une multitude de saillies et d'enfoncemens, en sorte que, dans le contact des deux surfaces, les saillies de l'une pénètrent dans les enfoncemens de l'autre; et par conséquent les rapports de ces deux surfaces ne peuvent changer sans que les saillies soient brisées, ou qu'elles sortent des enfoncemens pour surmonter leurs intervalles; ce qui suppose un certain degré d'écartement des deux corps qui doit absorber une petite partie du mouvement de translation. Telle est du moins l'idée qu'on se fait le plus généralement des causes du frottement; et en effet on observe que le frottement est d'autant moindre que les surfaces sont plus polies. Néanmoins, comme il est certain que dans le rapprochement de deux corps solides par une surface d'une certaine étendue, il se développe une puissance d'attraction entre les deux corps, puissance qui tend à établir une situation fixe, il est probable que cette influence de la cohésion peut être une des causes de la résistance qu'offre le frottement au déplacement des corps. On voit en effet qu'après un certain temps de contact et de repos, le frottement devient très grand, et qu'on obtient souvent une grande résistance au mouvement par le contact de deux surfaces parfaitement polies.

On distingue deux genres de frottement. Le *frottement du premier genre* est celui qui s'exerce entre deux surfaces dont l'une présente toujours les mêmes points de contact, en parcourant l'étendue de l'autre; comme un parallélipipède qui glisserait par une de ses faces sur un plan incliné. On nomme *frottement du second genre* celui dans lequel les points de contact des deux surfaces se renouvellent simultanément, comme il arrive à un cylindre qui roule sur un plan incliné.

On conçoit que le frottement du premier genre doit toujours être beaucoup plus considérable que celui du second genre, toutes choses égales d'ailleurs; car si le frottement dépend de la pénétration réciproque des inégalités, cette pénétration devra être vaincue simultanément pour tous les points de la surface dans les frottemens du premier genre, tandis que, dans le second cas, les inégalités se désengrèneront, en quelque sorte, par suite du mouvement de rotation, et n'offriront qu'une très faible résistance au mouvement. Si le frottement dépend d'un commencement de cohésion, elle sera beaucoup plus puissante entre deux surfaces étendues que dans la ligne de contact d'un cylindre avec un plan. Quoi qu'il en soit, l'un ou l'autre de ces frottemens se rencontrent comme obstacle dans toutes les actions mécaniques, et surtout dans les machines plus ou moins complexes; et la perfection consiste à substituer autant que possible le frottement du second genre au frottement du premier genre. C'est dans ce sens que l'on emploie les roues de voiture, les rouleaux que l'on place sous les pierres de taille que l'on cherche à mouvoir, et même les roues secondaires par lesquelles on fait supporter l'axe d'une roue principale dans la machine d'Atwood (67).

Le frottement des roues sur leurs axes est, à la vérité

un frottement du premier genre; mais il exerce peu d'influence, 1° parce que l'axe et l'ouverture qui le reçoit sont durs et polis; 2° parce que cette résistance agit au bout du rayon de l'axe, qui est un très petit levier; tandis que la puissance agit au bout du rayon de la roue, qui en présente un très grand.

L'évaluation du frottement étant d'une grande importance en mécanique, et ne pouvant être fournie que par des expériences directes, on a employé à cet effet deux méthodes différentes.

Dans la première méthode, on place un corps sur un plan horizontal, qui est susceptible de s'incliner peu à peu suivant des degrés connus; le corps ne se met en mouvement que lorsque le plan est parvenu à un certain degré d'inclinaison, position dans laquelle la résultante de la pesanteur dans la direction du plan a une intensité calculable, qui est exactement l'expression de la résistance du frottement à l'instant où il est vaincu par elle. On trouve que le frottement est proportionnel à la tangente de l'angle d'inclinaison du plan qu'on nomme *angle de frottement*, et qu'on désigne ordinairement par x, en sorte que le frottement égale $tang.\ x$.

La seconde méthode a été imaginée par Désaguilliers. Les expériences se font au moyen de l'instrument qu'on nomme tribomètre, et qui consiste en une roue pesante, dont l'axe a le moins de frottement possible, et se trouve retenu par un ressort en spirale; en sorte que si on la dérange de sa situation, elle y revient par des mouvemens de rotation opposés et alternatifs, qui durent d'autant plus long-temps que le frottement de l'axe est moindre. Plusieurs leviers peuvent appuyer sur cet axe par des surfaces plus ou moins grandes, et être chargés de poids divers. On observe dans tous ces cas le nombre d'oscillations de la roue,

et l'on en conclut les rapports des frottemens. On a trouvé par ces moyens :

1° Que le frottement du premier genre était toujours beaucoup plus considérable que celui du second.

2° Que le frottement est exactement proportionnel au poids ou à la force qui presse les surfaces frottantes.

3° Que l'étendue des surfaces frottantes n'a aucune influence sur le frottement, la pression restant la même.

4° Que la nature des corps influe beaucoup sur l'intensité du frottement, et qu'en général il est moindre entre des corps de nature différente, mais qui n'ont point d'affinité réciproque, comme le fer et le cuivre, par exemple.

5° Que le frottement est diminué par certains corps, tels que la plombagine ou la graisse, qui sont capables de remplir les petites cavités et d'augmenter le poli des corps.

6° Que dans le cas où les corps sont l'un et l'autre très durs et très polis, les corps onctueux peuvent augmenter le frottement dans les mouvemens très faibles.

7° Que l'eau ou les huiles, par la mobilité de leurs particules, diminuent beaucoup le frottement, et semblent agir comme de très petits corps sphériques qui changeraient le frottement du premier genre en frottement du second genre.

8° Que l'interposition des fluides, entre deux corps solides qui se frottent, a l'avantage très important de diminuer considérablement le dégagement de calorique qui a lieu par le frottement.

Enfin comme des évaluations à peu près positives sont indispensables en pareille matière, on peut compter qu'entre deux corps durs de nature différente et convenablement enduits, par exemple dans le cas d'une roue de cuivre fondu tournant sur un axe de fer abreuvé d'huile, la valeur

du frottement du premier genre est d'environ 0,09 de la pression qu'une surface exerce sur l'autre.

Pour donner une idée précise de ces effets dynamiques, nous dirons que si une pièce de vin pesant cinq cents kilogrammes est posée sur un traîneau glissant sur le pavé, la force nécessaire pour la déplacer sera d'environ 45 kilogrammes; mais si l'on place ce fardeau sur une voiture dont les roues aient deux pieds de rayon et l'essieu un pouce de rayon, le même frottement existera sans doute entre l'essieu et la boîte de la roue; mais cette résistance agira au bout d'un levier d'un pouce, tandis que la puissance qu'on emploiera pour déplacer la voiture agira au bout du rayon de la roue comme levier, c'est-à-dire au bout d'un levier 24 fois plus long, ce qui réduit la résistance du frottement à un peu moins de deux kilogrammes. Il est vrai que d'autre part on aura donné naissance à un frottement du second genre, qui se produira par le développement de la circonférence des roues sur le sol. Quant à ce dernier, il est extrêmement variable suivant les circonstances : il peut être considéré comme presque nul lorsque la roue et le plan sont durs et polis; il devient très considérable lorsque le sol est mou et que la roue s'y enfonce continuellement d'une certaine quantité; il n'est pas sensiblement augmenté par les saillies et les enfoncemens d'un sol d'ailleurs très dur, comme le pavé de nos routes, pourvu que le mouvement ait une certaine rapidité, et que le fardeau puisse profiter, pour surmonter une saillie, du mouvement qu'il a acquis en descendant dans un enfoncement.

On voit par ce qui précède que les plus grandes roues, les plus petits essieux, et les routes les plus dures sont les conditions les plus favorables à l'économie de la force dans les transports.

Si le frottement peut être considéré comme un obstacle fâcheux dans l'exécution d'un très grand nombre de mouvemens, il devient au contraire d'une utilité du premier ordre dans une foule de circonstances, en présentant des points d'appui à beaucoup de puissances qui sans lui ne sauraient être mises en action. En effet d'une part, presque aucun corps ne pourrait rester en repos sans l'existence du frottement; la plus légère inclinaison d'un plan, le plus faible dérangement dans les équilibres, produiraient dans la pratique une foule de mouvement incommodes.

Toutes les pressions exercées par les vis et par les coins ne se maintiennent qu'à l'aide des frottemens considérables qui s'établissent entre les surfaces en contact.

La mécanique animale ne semble pas favorablement disposée sous le rapport des frottemens qui se trouvent partout du premier genre, et presque jamais réduits dans leur importance au moyen des différences dans les bras de levier; ainsi la poulie mobile ordinaire de nos arts mécaniques sert à changer à volonté la direction des forces, mais elle tourne sur un axe d'un petit diamètre, tandis que les puissances s'appliquent à sa circonférence. Dans l'économie animale au contraire, les surfaces courbes qui représentent des poulies et en remplissent les fonctions, sont immobiles, et glissent seulement les unes sur les autres, comme si la corde d'une poulie glissait dans sa gorge, au lieu de la faire tourner sur son axe. Le frottement reste donc du premier genre et avec toute son intensité.

Pour obvier autant que possible à cet inconvénient, il se trouve dans toutes les articulations, et particulièrement dans celles qui exécutent de grands mouvemens, un fluide nommé synovie, qui est certainement une des productions les plus remarquables de l'organisation; elle n'est, à pro-

prement parler, ni solide ni liquide : sa consistance est visqueuse ; elle est filante, et tellement glissante qu'elle réduit à très peu de chose le frottement des surfaces qui en sont abreuvées, ces surfaces étant d'ailleurs par elles-mêmes d'un poli admirable. L'exercice des mouvemens augmente la sécrétion de la synovie, et le mécanisme animal porte ainsi en lui-même le moyen d'entretenir la facilité de ses mouvemens, tandis que nous sommes obligés de le fournir incessamment du dehors à nos machines artificielles. Il est certain du reste que l'huile, la graisse, la plombagine et le savon, qui sont entre nos mains les meilleurs moyens de diminuer les frottemens, n'approchent pas de la synovie pour la perfection de cet effet.

Si le frottement peut être considéré comme un obstacle au mouvement dans la machine animale, il devient d'un autre côté la condition en quelque sorte indispensable de la plupart des mouvemens, et particulièrement de ceux de locomotion.

On conçoit à la rigueur qu'un homme puisse se maintenir debout sur ses pieds, en admettant que le sol soit parfaitement poli ainsi que la plante de ses pieds : mais il serait physiquement impossible qu'il se déplaçât le moins du monde ; car, pour imprimer à l'aide de ses muscles un mouvement de translation horizontale à son centre de gravité, il est nécessaire qu'il trouve un point d'appui dans cette même direction horizontale et dans le sens contraire. Ce point d'appui se rencontre ordinairement dans le frottement qui empêche le pied de glisser sur le sol.

On trouve un exemple frappant de l'importance des frottemens, pour déterminer la locomotion, dans l'art de patiner ou de se mouvoir rapidement sur la surface polie de l'eau glacée : pour y réussir, on attache sous la plante de

ses pieds deux lames d'acier nommées *patins*, et sur lesquelles repose exclusivement le poids du corps.

Dans cet état, si les deux pieds sont parallèles, il est impossible d'exécuter aucun déplacement ; si l'on avance un pied, l'autre recule; au moindre mouvement irrégulier du corps les deux pieds se portent à la fois en avant ou en arrière ; il en résulte une chute qui est ordinairement assez grave. Ces difficultés tiennent à l'absence du frottement. Mais si l'on place le pied gauche dans la direction du chemin que l'on veut parcourir, en portant sur lui tout le poids du corps ; et si, d'une autre part, on place le pied droit en arrière et perpendiculairement à cette direction, en inclinant le pied de manière à ce que la carre tranchante du patin s'imprime dans la glace, il suffira d'un mouvement d'extension de la jambe droite pour imprimer à la masse du corps un mouvement rapide, qui ne sera détruit qu'au bout d'une longue course par le peu de frottement que le patin, mu suivant sa longueur, éprouve de la part de la glace : en reportant le poids du corps sur le pied droit, et répétant la même action avec la jambe gauche, on obtiendra une nouvelle impulsion qui s'ajoutera à la première, en telle sorte qu'on obtiendra une locomotion extrêmement rapide avec une très faible dépense d'efforts musculaires.

On voit que l'art de patiner consiste, en principe, à faire usage de deux instrumens qui, par un simple changement de position, puissent présenter tantôt un frottement presque nul qui use l'impulsion le plus lentement possible, tantôt un frottement très considérable qui serve de point d'appui aux efforts musculaires.

La locomotion n'est pas la seule circonstance dans laquelle le frottement fournisse aux efforts musculaires le point d'appui indispensable à leurs effets.

Le matelot qui s'élève dans les agrès d'un bâtiment au moyen d'une simple corde qu'il embrasse successivement avec ses deux mains, ne surmonte une aussi grande résistance qu'à l'aide du frottement qui s'établit entre l'intérieur de ses mains et la surface de la corde; l'exercice populaire du mât de cocagne repose sur le même principe, et le corps gras dont on enduit le mât ne retarde le succès des compétiteurs, qu'en diminuant l'importance des frottemens qui peuvent s'établir entre les membres croisés de celui qui fait effort pour s'élever et la surface du mât.

La longue canne du vieillard n'aide sa marche qu'au moyen du frottement que sa main produit en la serrant.

Tous les outils ou instrumens à l'aide desquels l'homme sait ajouter à la perfection mécanique déjà si remarquable de sa main, ne sont fixés et maintenus par elle qu'au moyen de frottemens plus ou moins considérables; aussi voit-on que l'intérieur de ce précieux organe est inégal, rugueux, et dépourvu de cette humeur onctueuse qui lubrifie le reste de l'appareil cutané.

Une nouvelle preuve du rôle particulier que joue le frottement dans les cas nombreux que nous venons de citer, ressort avec évidence de l'extrême difficulté que nous trouvons à saisir, à maintenir, à fixer certains corps naturellement polis ou gluans, comme la plupart des animaux qui vivent dans l'eau.

DES MOUVEMENS VIBRATOIRES DES CORPS SOLIDES.

158. Jusqu'ici nous avons considéré les corps solides dans des états de mouvemens qui déplaçaient toutes leurs molécules simultanément dans l'espace, ou qui les faisaient tourner autour d'un centre ou d'un axe. Mais si l'on se rappelle ce que nous avons dit (107) de l'élasticité des corps

solides, on concevra facilement que des particules matérielles qui sont situées, relativement les unes aux autres, à des distances déterminées, et qui s'y trouvent en équilibre entre les puissances opposées de l'attraction et de la répulsion du calorique, peuvent éprouver des agitations partielles dans lesquelles la masse du corps paraîtra immobile, tandis que chaque molécule, ayant été écartée de sa situation primitive, y reviendra par des oscillations successivement décroissantes, à peu près comme la lentille d'un pendule qui, se trouvant en équilibre entre la pesanteur et la résistance du point de suspension, exécute des oscillations quand on vient à la déranger de cette position. C'est à cette agitation des particules matérielles qu'on donne le nom de *mouvement vibratoire.*

Les mouvemens vibratoires des particules d'un corps solide pourront être insensibles à l'œil si le corps a très peu d'étendue; ils pourront devenir apparens, s'ils se transmettent à l'extrémité d'un très long levier. C'est ainsi que les vibrations des molécules centrales d'une lame élastique que l'on a courbée produisent à ses deux extrémités des mouvemens très considérables. On peut rendre sensibles et très apparens des mouvemens vibratoires extrêmement petits, en les appliquant à un levier très long; c'est ce qui arrive dans la balance de torsion dont nous parlerons bientôt.

On conçoit que les agitations partielles des particules d'un corps ne peuvent le plus souvent être produites que par une impression brusque, comme un choc, un frottement rude, etc.

Les mouvemens vibratoires se passent, comme tous les autres phénomènes naturels, au milieu de l'atmosphère qui, comme nous le verrons par la suite, est elle-même formée d'un fluide élastique capable d'éprouver des vibrations;

en sorte que celles des corps solides se transmettent à l'air. Notre organe de l'ouïe a été d'une autre part disposé de manière à percevoir les impressions produites par les vibrations de l'air, ce qui constitue ce qu'on appelle le *son*. Il faut seulement remarquer que la susceptibilité de notre organe a des limites déterminées; que des vibrations trop lentes ne font aucune impression sur lui, et qu'il en est de même des vibrations trop rapides: en sorte qu'il n'y a pas de son pour nous lorsqu'il ne s'exécute que 32 vibrations par seconde, et qu'il n'y en a plus lorsqu'elles vont à 10 ou 12000. On peut donc établir que le son n'est qu'une circonstance accessoire de la vibration des corps. Mais la disposition de notre organe de l'ouïe est telle que, dans les cas où le son est produit, il peut servir très commodément à reconnaître les vitesses comparatives des vibrations, attendu que ces différentes vitesses produisent des sons différens que l'oreille juge avec beaucoup de précision, et qu'on appelle *graves* ou *aigus*, suivant qu'ils sont produits par des vibrations plus lentes ou plus rapides. Nous allons examiner successivement les phénomènes de vibration des corps solides dans la *balance de torsion*, dans les *cordes tendues*, dans les *tiges solides*, dans les *surfaces planes*, dans les *membranes tendues*, et enfin la communication de ces vibrations à travers les corps solides.

DE LA BALANCE DE TORSION.

159. La balance de torsion est un instrument fort ingénieux, imaginé par Coulomb, et qui a été d'un grand secours aux physiciens pour mesurer avec précision de très faibles puissances. Ses effets sont fondés sur cette circonstance qu'un fil très fin, d'une nature quelconque, soustendu par un petit poids, peut être tordu dans toute sa

longueur, et revenir ensuite exactement à son premier état. Il est évident que ce phénomène tient à l'élasticité, et que dans la torsion toutes les molécules ont éprouvé un très léger déplacement, et tendent par conséquent à revenir à leur situation première avec une force d'autant moindre que le fil est plus fin. On conçoit même que dans ce retour le fil devra se tordre dans le sens opposé, puis revenir encore à sa première situation, et ainsi successivement par des oscillations qui, pour devenir sensibles, n'ont besoin que d'être appliquées à un levier transversal d'une assez grande étendue.

La balance de Coulomb consiste en effet en un fil métallique très fin, ou en un fil de cocon de ver à soie, attaché par son extrémité supérieure à un pivot tournant muni d'une aiguille et d'un cadran. Ce fil descend à travers une colonne creuse de cristal, jusqu'au milieu d'une caisse de même substance. A l'extrémité inférieure de ce fil est attaché un levier horizontal en équilibre par son milieu et terminé par deux petites masses. Ce levier peut être en métal ou en gomme laque pour les expériences d'électricité. Le fond supérieur de la caisse de cristal offre une ouverture qui se ferme à volonté, mais par laquelle on peut introduire les corps qui peuvent agir sur le levier, et dont on veut mesurer les puissances attractives ou répulsives. Cette balance peut du reste être simplifiée dans plusieurs cas et modifiée dans plusieurs circonstances. Dans l'état où nous venons de la décrire, le levier est à l'abri des agitations de l'air; l'intensité de la torsion peut être mesurée exactement, et les états électriques se conservent long-temps dans l'intérieur, où l'on peut dessécher l'air par des substances hygrométriques.

Pour donner une idée de l'usage de cette machine, supposons que l'on veuille reconnaître la force répulsive d'une

petite sphère de métal électrisée. On attachera cette sphère au bout d'une tige isolante; on la plongera dans la balance vis à vis l'une des extrémités du levier horizontal, qui en sera d'abord attiré, et immédiatement après repoussé. Cette répulsion tordra le fil de suspension. Mais si l'on fait tourner en sens contraire le pivot auquel le fil est attaché, on augmentera la torsion jusqu'au point de ramener l'extrémité du levier au contact de la petite sphère électrisée. On jugera alors de la torsion produite par le nombre de degrés qu'aura parcourus l'aiguille du pivot sur le cadran supérieur; et toutes les expériences prouvent que la force de torsion est exactement proportionnelle à l'angle de torsion : par conséquent le nombre de degrés de cet angle sera, dans le cas supposé, l'expression exacte de la force de répulsion cherchée.

Si, la balance étant libre, on écarte le levier de sa situation naturelle, il reviendra et la dépassera, pour revenir encore par des oscillations successives et isochrones, qui iront en diminuant d'amplitude à cause de la résistance de l'air. Si l'on place vis à vis ce levier oscillant un corps qui exerce sur lui une attraction quelconque, les oscillations deviendront plus rapides, et le carré de leur nombre, dans un temps donné, fournira la mesure de l'attraction nouvelle. Nous avons vu (77) que cette expérience avait servi à constater et à mesurer l'attraction à distance entre les petites masses qui, sans l'ingénieux instrument que nous venons de décrire, ne serait encore qu'une supposition.

On voit que les oscillations provenant de la torsion en spirale doivent être fort lentes. Il en existe de beaucoup plus rapides dans les corps solides, comme nous le verrons plus tard.

Il résulte des recherches de Coulomb, que la force de

torsion d'un fil métallique est en raison inverse de sa longueur et en raison directe de la quatrième puissance de son diamètre.

L'analyse donne pour la valeur de l'angle de torsion d'un cylindre $\omega = \frac{2M}{\pi A R^4 z}$: ω est l'angle de torsion, M la force qui produit la torsion, z la longueur du cylindre, A ce qu'on appelle le coefficient de l'élasticité, et R le rayon du cylindre.

En sorte que la quantité dont le fil se tord est en raison directe de sa longueur, en raison directe de la force qui le tord, en raison inverse de son élasticité, et en raison inverse de la quatrième puissance de son rayon.

Comme, au reste, un fil qui est tendu par un poids représente exactement un pendule, lorsque son élasticité de torsion est employée à faire osciller un levier transversal, ce levier suit toutes les lois du pendule.

1° Les temps des oscillations sont comme la racine carrée des poids qui soutendent le fil.

2° Sous la même torsion les temps sont comme la racine carrée des longueurs du fil.

3° Enfin ces temps sont en raison inverse de la racine carrée des diamètres des fils.

On conçoit qu'en mesurant exactement l'angle de torsion d'un fil donné, d'une substance donnée, par une force connue, on connaîtrait, dans la formule $\omega = \frac{2M}{\pi A R^4 z}$, ω, R, M et z; on pourrait donc en tirer la valeur de A ou du coefficient d'élasticité : c'est ainsi, et d'après les expériences de M. Biot, que l'on a obtenu les résultats que nous avons indiqués aux articles *Extensibilité* et *Compressibilité*.

DES VIBRATIONS DANS LES CORDES TENDUES.

160. Une corde ou un fil cylindrique de métal ou de toute autre substance ne présente dans son état naturel aucun caractère apparent d'élasticité; cependant il est facile de s'assurer que cette élasticité existe. Car si l'on tire, suivant sa longueur, ce fil ou cette corde avec une force qui ne soit pas capable de la rompre, elle s'alonge d'une quantité sensible et revient bientôt sur elle-même, la force cessant d'agir, pour reprendre exactement sa longueur première. Ainsi les corps dont nous parlons sont élastiques quand ils sont tendus, et cette élasticité est d'une nature particulière qu'il est bien important de distinguer, puisqu'on voit qu'elle dépend d'un état d'équilibre forcé entre l'attraction de cohésion et la force de traction qui tend à diviser la corde. Aussi les corps dont la ténacité est plus considérable, comme le fer, le cuivre, la corde à boyau, etc., sont-ils les plus propres à devenir élastiques par tension.

Pour faire des expériences sur l'élasticité des cordes, on se sert d'un instrument que l'on nomme *sonomètre* ou *monocorde*, parce qu'il sert à mesurer les sons et ne porte qu'une corde. Il est en effet composé d'une corde métallique ou autre, suspendue verticalement, fixée par son extrémité supérieure, et tendue inférieurement par un poids connu et variable à volonté. Une pince mobile dans la longueur de la corde sert à la fixer inférieurement. Une échelle donne la mesure de ces diverses longueurs, et le tout est joint à une caisse de bois mince destinée à augmenter l'intensité des sons que la corde pourra produire.

Une corde, disposée comme nous venons de l'indiquer, ou sur un appareil analogue, mais horizontal, est suscep-

tible de deux modes de vibrations, les unes transversales, les autres longitudinales.

161. Les vibrations transversales sont aisément produites en écartant le milieu de la corde de sa direction rectiligne, et l'abandonnant tout à coup à elle-même : on voit alors la corde passer rapidement d'un état de courbure dans un sens, à un état de courbure dans le sens opposé. Ces oscillations sont isochrones; mais elles diminuent rapidement d'amplitude, et la corde arrive bientôt au repos et à la direction droite qu'elle avait primitivement. On conçoit en effet qu'étant donné le poids qui soutend la corde, la longueur est au *minimum* quand la corde est droite, et qu'elle augmente dans les courbures alternatives qu'elle prend. Au reste, ces vibrations sont ordinairement si rapides, que l'œil ne pouvant les distinguer, on croirait réellement la corde plus grosse pendant qu'elle vibre que dans l'état de repos. On voit encore que les deux points fixes sont immobiles, et que le *maximum* du mouvement doit être dans le milieu de la longueur de la corde. On nomme *ventre* ce lieu du plus grand mouvement, et *nœuds* les points de la corde qui sont immobiles.

Les vitesses des vibrations, dans une corde donnée, sont modifiées, 1° par la longueur de la corde; 2° par son diamètre; 3° par sa tension. On trouve par le calcul, et l'on démontre par l'expérience :

1° Que dans des cordes semblables et également tendues, le nombre des vibrations dans un temps donné est en raison inverse des longueurs.

2° Qu'avec la même longueur et des tensions égales, les nombres des vibrations dans des temps donnés sont en raison inverse des diamètres.

3° Enfin que la longueur et le diamètre restant les mêmes, les nombres des vibrations dans un temps donné

sont en raison directe des racines carrées des tensions ou des poids qui les produisent.

On peut se rendre un compte exact de ce qui se passe dans les vibrations d'une corde, en considérant que la force qui la maintient tendue est la véritable puissance qui détermine les vibrations, et que cette puissance doit mettre en mouvement toutes les molécules de la corde, c'est-à-dire sa masse entière. Or, si la puissance reste la même, chaque molécule aura d'autant moins de vitesse que la masse sera plus grande; et si la masse reste la même, les vitesses devront être comme les racines carrées de la puissance, ainsi qu'il arrive au pendule : la longueur de la corde exercera aussi son mode d'influence, et les méthodes mathématiques conduisent à exprimer toutes ces conditions et toutes ces circonstances par la formule $N = \frac{\sqrt{gP}}{rl\sqrt{\pi\delta}}$. Dans cette formule, N est le nombre de vibrations pendant une seconde; g est la gravité; P le poids ou la force de tension; r le rayon de la corde; l sa longueur; π le rapport de la circonférence au diamètre, et δ la densité de la substance. On peut en conclure directement que le nombre des oscillations, dans un temps donné, est en raison inverse du rayon, en raison inverse de la longueur, en raison inverse de la racine carrée de la densité, et en raison directe de la racine carrée de la tension, π et g étant constans.

Presque toutes les cordes tendues de manière à pouvoir vibrer, produisent plus de 32 vibrations dans une seconde, et ce n'est pas avec elles que l'on peut reconnaître ce que nous avons dit de l'absence du son dans ces vibrations lentes. En conséquence, il est absolument impossible de constater les lois que nous venons d'annoncer, en comptant les vibrations. Mais comme les vibrations rapides produisent un son, c'est à l'aide de ce son même que l'on

juge de leur rapidité. Il est, en général, d'autant plus aigu que les vibrations sont plus rapides, et d'autant plus grave qu'elles sont plus lentes. Or, comme les différens tons de l'échelle musicale sont, ainsi que nous le dirons plus tard, très appréciables à l'oreille, et relatifs à la vitesse des vibrations, on peut répéter aisément toutes les expériences nécessaires, en faisant varier les longueurs, les diamètres et les poids, et faisant rendre des sons à la corde, soit en la pinçant, soit au moyen d'un archet.

Si l'on fait vibrer une corde donnée sous une tension déterminée, et qu'on appelle *ut* le son qu'elle produit, en la raccourcissant de moitié, en réduisant son diamètre à moitié, ou en quadruplant le poids qui la tend, on obtiendra également un autre son qui s'appelle aussi *ut*, qui est l'*octave aiguë* du premier et qui répond à des vitesses doubles. En réduisant la longueur de la corde au tiers, ou bien son diamètre, ou enfin en la tendant par un poids 9 fois plus grand que le premier, on obtiendra le *sol* au dessus de l'*ut* aigu, et ces trois sons désignés par les nombres de vibrations qui les produisent, pourront être représentés par les nombres 1, 2 et 3.

Il semblerait que l'on pût obtenir ainsi d'une corde tous les sons possibles : cependant si la corde est fine, elle ne pourra donner de sons graves qu'avec une très grande longueur et une trop faible tension. Si elle est grosse, on réussit difficilement à la faire vibrer quand elle est courte et très tendue; c'est pourquoi dans tous les instrumens à corde, on en place plusieurs à côté les unes des autres et de différens diamètres, comme on le voit dans le violon.

Lorsqu'une corde tendue rend un son quelconque, ou est animée d'une vitesse d'oscillation déterminée, une oreille exercée, écoutant attentivement, peut distinguer, indépendamment du son produit par la corde entière, un

certain nombre de sons plus aigus; et si le son primitif est exprimé par 1, on entend aisément les sons exprimés par 3 et 5; on peut encore distinguer l'octave ou le son exprimé par 2, et même la double octave qui est exprimée par 4: en sorte que la corde produit, indépendamment du son relatif à sa longueur, tous les sons qu'elle produirait en la subdivisant suivant la série des nombres entiers 1, 2, 3, 4, etc. Il faut donc qu'il existe effectivement dans la corde des subdivisions spontanées qui produisent des vibrations partielles, et c'est ce dont il est facile de s'assurer par l'expérience. En effet, si l'on prend une corde tendue horizontalement, et que l'on place sur sa longueur de petits chevalets de papier blanc dans tous les lieux géométriques de ces subdivisions possibles, et d'autres chevalets de papier coloré dans le milieu de l'intervalle de ces divisions, et si dans cet état on fait légèrement vibrer la corde avec un archet, tous les papiers colorés seront immédiatement lancés au loin, et tous les papiers blancs resteront en place; car les premiers se trouvaient placés sur les ventres de vibration dans les lieux de *maximum* du mouvement, tandis que les papiers blancs se trouvaient placés dans les points où la corde se divise spontanément, et qui forment ce que nous avons nommé *nœuds de vibration*.

Les cordes sont tellement disposées à se diviser ainsi spontanément, qu'il suffit de toucher légèrement vers la moitié de sa longueur une corde tendue, qui rend un son nommé *ut*, par exemple, pour qu'elle se divise aussitôt en deux parties, dont l'une donne l'octave de l'autre. C'est par cette méthode qu'on obtient sur la harpe ou sur la guitare des *sons harmoniques*. Cette division spontanée des corps vibrans est un fait général d'une grande importance, et dont nous trouverons de nombreuses applications en traitant des vibrations de l'air et de l'*acoustique*. Il est es-

sentiel de remarquer que, lorsque deux parties d'une corde vibrent séparément par une division spontanée, facilitée par un léger contact, les oscillations des deux parties sont constamment opposées l'une à l'autre, comme on le voit (*fig.* 56).

162. Les cordes tendues paraissent susceptibles d'un autre mode de vibrations, que l'on nomme *longitudinales.* On suppose qu'elles sont produites par des oscillations des tranches de la corde dans le sens de sa longueur; elles ne sont point visibles, et on les détermine en frottant la corde longitudinalement. Les sons produits par ce mode de vibration sont en général beaucoup plus aigus. La corde peut se subdiviser dans ce cas-ci comme dans le précédent; mais cela n'arrive que quand on la touche dans un point convenable. Les divers sons produits ont entre eux les mêmes rapports que nous avons indiqués précédemment; mais ils sont tellement aigus, que, pour les rendre appréciables, il faut se servir de cordes extrêmement longues. On peut reconnaître les vibrations de cette espèce en frottant un crin saisi entre les dents et fortement tendu.

MOUVEMENS DE VIBRATION DANS LES VERGES SOLIDES.

163. Une tige d'un corps solide quelconque, de fer ou de cuivre, par exemple, est susceptible d'entrer en vibration par divers modes d'impulsion et dans différentes circonstances. On sait, par exemple, qu'une clé posée en équilibre sur un doigt, et frappée avec une autre clé, rend un son déterminé. On conçoit que les vibrations de semblables corps peuvent avoir lieu sans aucune tension préliminaire, puisqu'une tige métallique tend à conserver sa forme, ou à y revenir par elle-même ou par les seules forces de la cohésion.

Les vibrations de ces sortes de corps suivent des lois fort différentes de celles des cordes tendues, comme il est facile de le prévoir en considérant que la force élastique repose ici dans la cohésion même, et s'accroît rapidement avec les épaisseurs.

Les verges élastiques sont susceptibles de vibrations transversales et longitudinales.

164. Les vibrations transversales peuvent être produites, 1° en fixant l'une des extrémités de la tige dans un étau; 2° en la soutenant par son milieu et lui donnant un choc; 3° enfin, en passant un archet sur un des points de sa longueur. Dans le premier cas, on peut employer une verge assez longue pour qu'en la fléchissant par son extrémité libre, et l'abandonnant subitement à elle-même, elle produise des vibrations assez lentes pour être comptées; et on observe alors qu'au dessous de 32 par seconde elles ne produisent pas de son appréciable. On trouve aussi que les vitesses des vibrations sont en raison inverse des carrés des longueurs. On trouve encore que les vitesses des vibrations sont directement proportionnelles aux épaisseurs. Et en général quand la nature de la matière et les rapports de longueur et d'épaisseur sont les mêmes, les nombres des vibrations sont en raison inverse des racines cubiques des poids, ou comme les cubes des dimensions.

Les verges élastiques se subdivisent dans leurs vibrations comme les cordes tendues, ce dont on s'assure aisément par le moyen suivant. Si l'on prend une tige métallique aplatie et horizontale, et qu'on la saupoudre de sable sec, au moment où elle vibrera, tous les petits grains de sable placés vis à vis les ventres de vibration éprouveront de petites impulsions rapides, qui les feront sautiller, et les enverront, par une multitude de petites courbes paraboliques, vers es extrémités de la courbe de vibration, c'est-à-dire vers

les nœuds de vibration; en sorte qu'au bout d'un instant la totalité des grains de sable se trouvera amoncelée dans le lieu même de ces nœuds.

On trouve ainsi que les tiges élastiques produisent, en se subdivisant, une série de sons semblables à ceux que produisent les cordes; mais que les dimensions de la subdivision suivent les lois que nous venons d'indiquer. Il arrive encore que ces subdivisions se produisent diversement, savoir : lorsque l'un des bouts est fixé, lorsque l'un des bouts est seulement appuyé, lorsque les deux bouts sont libres, lorsque les deux bouts sont appuyés, lorsque les deux bouts sont fixés, ou enfin lorsque l'un des bouts est fixé et l'autre appuyé. Et l'on conçoit qu'il se formera de préférence des nœuds de vibrations dans les points qui seront rendus immobiles par un contact, mais que les divisions pourront devenir très nombreuses; si, par exemple, la verge est suspendue par un point qui ne réponde pas à une des grandes subdivisions. Dans tous les cas, les oscillations des diverses parties de la verge élastique se font en des sens contraires comme celles des cordes (1).

Lorsqu'on courbe les verges vibrantes, les nœuds de vibration se rapprochent, et les sons deviennent plus graves pour un même nombre de nœuds. L'instrument qu'on nomme *diapason* offre un exemple de ces sortes de vibra-

(1) Giordano Riccati a trouvé la formule suivante, qui exprime les lois de vibration des corps solides en général : $N = \frac{n^2 e}{l} \sqrt{\frac{g s}{\delta}}$

N est le nombre de vibrations dans une seconde; e l'épaisseur du corps; l sa longueur; s la rigidité de la matière dont il est fait; δ sa densité; g la gravité; et enfin n est un nombre constant pour un même corps mis en vibration de la même manière, mais qui varie suivant le nombre des nœuds qui s'établissent pendant la vibration. On déduira facilement toutes les conséquences de cette formule; elles ont été vérifiées avec soin par l'expérience.

tions. Il consiste (*fig.* 57) en un barreau d'acier recourbé sur lui-même un peu au delà du parallélisme des deux branches, et pouvant se poser sur un pied attaché à la courbure. Lorsqu'on tient l'instrument par le pied, et qu'on introduit entre ses branches et près de la courbure un morceau de fer un peu trop gros pour sortir librement entre les extrémités, si l'on tire subitement ce morceau de fer, les deux branches entrent en vibration et produisent un son constant qui est peu sensible par lui-même, mais qui devient considérable en posant le diapason sur la caisse d'un instrument de musique. Ce son est, du reste, beaucoup plus grave que ne semblerait comporter la longueur des tiges métalliques.

On a dernièrement tiré un parti remarquable de l'augmentation de gravité des sons par le seul fait de la courbure des verges sonores. On construit depuis quelque temps des horloges sous forme d'un tableau qui représente une église de village, dont le cadran marque les heures. Sa sonnerie imite avec beaucoup d'illusion le son d'une cloche entendu d'un peu loin. Ce phénomène est produit par une tige métallique courbée en spirale, fixée par son centre, et frappée par le marteau à peu de distance du point fixe.

Un anneau continu peut vibrer aussi, et se partage ordinairement par un nombre pair de nœuds de vibration.

165. Les verges solides sont, comme les cordes, susceptibles de vibrations longitudinales, auxquelles on peut appliquer tout ce que nous avons dit de celles des cordes, car elles s'obtiennent par frottement : elles produisent des sons excessivement aigus, et les divisions donnent des sons proportionnels aux longueurs; mais on observe, à l'aide de l'ingénieux procédé de M. Savart, des phénomènes qui semblent opposés à l'explication admise pour les cordes,

que les vibrations s'opèrent dans des tranches parallèles les unes aux autres. En effet, un des modes remarquables de produire ces vibrations consiste à tenir légèrement entre les doigts une tige aplatie, de verre, par exemple, et à la frapper à l'une de ses extrémités dans le sens de sa longueur. Si la face supérieure de cette lame est recouverte de sable, on ne voit plus ces grains de sable sauter, comme dans le cas des vibrations transversales, mais on les voit courir le long de la lame de verre, et se rassembler pour indiquer un grand nombre de nœuds dont la situation varie suivant le point par lequel on tient la lame; et si l'on vient à renverser cette lame, on trouve qu'il se forme sur la nouvelle face supérieure autant de nœuds que sur la précédente, mais qu'ils correspondent précisément aux ventres de la face précédente, et réciproquement.

On a encore observé, dans les verges rigides, des vibrations que M. Chladni a nommées *tournantes*, et qu'on peut se représenter comme de véritables torsions. On conçoit aisément l'existence de semblables vibrations, puisque nous avons vu qu'elles existaient dans un fil très fin, et qu'elles étaient d'autant plus rapides que le diamètre était plus grand. Si donc, au lieu d'un fil très fin, on emploie une tige rigide d'un diamètre beaucoup plus considérable, la vitesse des vibrations pourra devenir assez grande pour produire un son.

DES VIBRATIONS DANS LES SURFACES PLANES.

166. Un corps solide élastique quelconque est toujours susceptible de vibrations communes et dans tous les sens, et par conséquent de produire un son continu. Cependant il arrive, dans beaucoup de cas, que ce son continu ne peut pas être produit par les moyens ordinaires. Ainsi, en frap-

pant sur une table de bois de chêne, on produit un *bruit* instantané, mais non pas un son continu. Si pourtant une des parties de ce corps est amincie et polie, en la frottant avec un archet on pourra faire produire à toute la masse un son donné. On a imaginé un moyen simple et qui s'applique à tous les cas dans lesquels on veut faire entrer en vibration une masse quelconque : ce moyen consiste à fixer à un des points de la masse un petit cylindre de verre sur lequel on fait glisser un archet.

Les vibrations des masses solides agitées dans toutes les dimensions sont encore peu connues. On sait seulement que ces masses se partagent toujours en un plus ou moins grand nombre de parties qui vibrent chacune à leur manière, sans que toutes ces vibrations différentes se gênent les unes les autres. Le cas le plus simple de cette question complexe consiste à faire vibrer des plaques de verre, de métal ou de bois, d'une forme ronde ou carrée. On détermine la vibration en passant un archet sur le bord de la plaque. On peut fixer la lame par différens points.

Si la lame est carrée et fixée par son centre, si on la fait vibrer près d'un de ses angles, on obtiendra le son le plus grave qu'elle puisse donner, et le sable qu'on aura répandu sur sa face supérieure s'arrangera comme dans la *fig.* 58.

Si on fait vibrer la plaque par le milieu d'un de ses côtés, le sable s'arrangera comme dans la *fig.* 59.

Si par de légers contacts on facilite de nouveaux nœuds, on obtiendra des figures très variées; par exemple, dans la *fig.* 60, en faisant vibrer par le point B, il suffira d'un léger contact au point A pour former les quatre courbes indiquées.

Pour une plaque circulaire, si elle est fixée par son centre, qu'on la touche au point A, qu'on la fasse vibrer au point

B (*fig.* 61), on aura une accumulation au centre, et les six rayons indiqués.

Si l'on touche la plaque par le bord, et qu'on la fasse vibrer tout près de ce point de contact, on aura une ligne nodale et un cercle, comme dans la *fig.* 62. On pourra multiplier les diamètres en écartant le point de vibration du point de contact.

Il est très remarquable que dans ces sortes d'expériences, pendant qu'une poudre pesante et grossière, comme du sable coloré, s'arrange et se groupe pour dessiner les figures que nous venons de décrire, s'il se trouve en même temps sur la plaque une poussière beaucoup plus fine, elle se groupe et s'arrange tout différemment; elle forme fréquemment de petits amas dans le centre des divisions tracées par la poussière pesante.

Si l'on fait usage d'une grande plaque de cuivre circulaire et fixée par son centre, on obtient aisément tous les résultats que nous venons d'indiquer; et de plus, si l'on attaque avec l'archet le bord de la plaque, à la manière de la grosse corde d'une contre-basse, alternativement dans un sens et dans l'autre, on réussit à mettre en mouvement la poussière fine, de manière à ce qu'elle produise une sorte de courant rapide et circulaire situé à environ 18 lignes du bord de la plaque, pendant qu'un autre courant à peine visible, et formé des particules les plus fines de la poussière, tourne avec autant de rapidité que le précédent, mais dans un sens opposé et très près du bord de la plaque.

Ces curieux phénomènes sont évidemment produits par des vibrations du genre de celles que nous avons appelées longitudinales dans les verges élastiques, et qui deviennent tournantes dans la figure circulaire de la plaque dont on a fait choix.

Tout ce que nous venons de dire s'applique aux corps d'une nature homogène. Mais dans le cas où les plaques présentent un tissu particulier, comme celui du bois par exemple, l'un des axes est toujours suivant la longueur des fibres. On voit aussi que, dans ce cas, le son le plus grave ne s'obtient pas par la division en quatre parties, mais lorsque le sable s'accumule au centre.

VIBRATION DES MEMBRANES TENDUES.

167. Lorsqu'une membrane élastique est tendue, elle est extrêmement susceptible de vibration, comme il est facile de s'en assurer en la recouvrant de sable. Ces vibrations peuvent lui être communiquées par beaucoup de moyens différens, et particulièrement par l'air lui-même. Il a été jusqu'ici complètement impossible de calculer et de prévoir les effets de ces vibrations dans ces sortes de corps; mais on a démontré qu'il se formait sur toutes les membranes, quelle que soit d'ailleurs leur tension, des figures relatives à la nature de l'ébranlement communiqué, et ce fait a été d'une grande ressource, comme nous le verrons par la suite, pour apprécier et distinguer les vibrations qui se produisent par l'air même.

On sait que l'organe de l'ouïe est séparé de l'air extérieur par une membrane qui non seulement est habituellement tendue, mais qui peut être plus ou moins solidement fixée par son centre au moyen des osselets. On avait présumé jusqu'ici que le plus ou moins de tension de la membrane avait pour objet de la mettre d'accord avec des sons plus aigus ou plus graves; mais M. Savart a prouvé que cette condition était tout à fait superflue, et il est devenu très probable que la tension de la membrane a pour but de prévenir la trop grande amplitude de ses vibrations,

qui dans les sons très forts pourraient blesser l'organe de l'ouïe, et s'opposer par là même à la perception distincte des sons.

TRANSMISSION DES VIBRATIONS A TRAVERS LES CORPS SOLIDES.

168. Lorsque des vibrations ont été produites dans une partie d'un corps quelconque, elles peuvent se transmettre à toute l'étendue de ce corps, et même à tout un système de corps avec lequel le premier serait en contact. Cette faculté de transmission est propre à accroître considérablement les effets des vibrations sous le rapport du son; et on en a profité dans la construction d'un grand nombre d'instrumens, où l'on voit des corps sonores d'un petit volume, comme des cordes, attachées sur des caisses à parois élastiques, qui résonnent simultanément et renforcent beaucoup les sons primitifs.

On a fait de nombreuses recherches pour découvrir les lois de transmission des vibrations sonores, soit à travers le tissu d'un même corps, soit d'un corps à un autre. On peut consulter à ce sujet le mémoire de M. Savart (*Annales de Physique et de Chimie*, t. 14, p. 113); nous ne nous occuperons ici que des phénomènes directement applicables à la médecine ou aux circonstances vulgaires.

Il paraît que les vibrations se transmettent dans les corps solides à la manière dont le mouvement se transmet entre des billes élastiques; et si l'on considère le corps solide qui transmet les vibrations comme frappé à l'une de ses extrémités par une suite de petits chocs résultans des vibrations du corps primitivement ébranlé, on concevra qu'un premier choc se transmettra de point en point le long du corps solide, de manière que la dernière molécule seule sera agitée, toutes les autres étant revenues à l'état de

repos après avoir reçu et communiqué le mouvement. Mais si le corps solide est assez long pour qu'un second choc du corps vibrant se produise avant que le premier ait été transmis jusqu'à l'extrémité, on conçoit qu'il y aura, dans le corps conducteur, deux parties en mouvement, séparées par un intervalle en repos, et qu'il pourrait de même se rencontrer un grand nombre de ces intervalles égaux le long du corps conducteur. C'est à ces intervalles qu'on donne le nom d'*ondes sonores*. Il est évident que les ondes seront d'autant plus courtes que le mouvement sera plus rapide ou le son plus aigu, et réciproquement.

Une foule de faits démontrent que la transmission des vibrations se fait avec beaucoup plus de force et de vitesse à travers les corps solides que par l'intermède de l'air, et même que cette transmission est plus forte et plus complète lorsque le corps solide a des fibres longitudinales. On entend le grattement produit par la pointe d'une épingle sur une des extrémités d'une longue poutre; en plaçant l'oreille à l'autre bout. On entend le battement d'une montre en la plaçant entre les dents. Si l'on suspend une pincette par un ruban de soie dont on applique les deux extrémités sur les deux oreilles, et que l'on frappe la pincette, on entendra un son très bruyant, et qui paraîtra disproportionné avec l'instrument qui le produit.

Notre savant confrère Laënnec a tiré un très grand parti de cette propriété des corps solides, de transmettre les sons avec force jusqu'à l'oreille par l'intermède des os mêmes du crâne. L'instrument qu'il a nommé *stéthoscope* consiste en un cylindre de bois dont une extrémité est appuyée sur la poitrine, pendant que l'autre appuie sur la région de l'oreille de l'observateur, qui, dans cette position, entend distinctement tous les bruits qui peuvent se produire dans l'intérieur de la poitrine, et cela avec une telle précision, que

chaque bruit, reconnaissable et qualifié par l'auteur de l'*Auscultation médiate*, représente toujours une altération déterminée des fonctions circulatoire et respiratoire.

On a recherché par des expériences directes quelle pouvait être la vitesse de transmission du mouvement vibratoire sonore à travers les corps solides, et on a trouvé :

1° Que la transmission par les corps solides était toujours beaucoup plus rapide que par l'air.

2° Que la transmission était plus ou moins rapide à travers différens corps solides; en sorte, par exemple, que la vitesse de transmission dans l'air étant représentée par 1, la vitesse de transmission de l'étain serait 7 et 1/2, celle de l'argent 9, celle du cuivre 12, celle du fer 17, celle des différentes espèces de bois de 11 à 17.

Ces résultats ont été conclus théoriquement, par M. Chladni, de la nature du son produit par des verges métalliques comparées à des colonnes d'air.

M. Biot a déterminé, par des expériences directes faites sur les tuyaux de conduite en fonte placés dans les égouts de Paris, que la vitesse du son était dans ce métal de 3538 mètres par seconde, lorsqu'elle n'est dans l'air que de 337 mètres.

3° Il est prouvé que les différens sons dont la vitesse des vibrations est si différente, se transmettent pourtant avec une vitesse égale à travers chaque corps, à travers l'air, par exemple, puisqu'un chant quelconque se reproduit à une grande distance avec beaucoup d'exactitude.

4° Enfin, et c'est ici le phénomène le plus extraordinaire de cette transmission, il est évident qu'une multitude de vibrations, ayant chacune leur vitesse différente, peuvent se transmettre simultanément et dans tous les sens, à travers un corps quelconque, sans se nuire réciproquement.

DES MOUVEMENS DE L'HOMME.

169. Nous n'avons pas l'intention d'insérer ici, comme faisant partie d'un traité de physique médicale, un traité de la mécanique des animaux, ni même un traité complet de la mécanique de l'homme. Ce sujet a été traité par un grand nombre de savans, et plus particulièrement par Borelli et Barthès. En outre, tous les physiologistes et anatomistes ne manquent pas de consacrer, soit dans leurs écrits, soit dans leurs leçons, les principales applications de la statique et de la dynamique générale, à la station et aux mouvemens partiels ou généraux de l'homme. Nous ferons seulement remarquer qu'il nous arrive assez souvent d'être consulté par les plus habiles anatomistes sur des questions relatives aux mouvemens partiels de l'homme, et qui ont été jusqu'ici négligées ou mal résolues : que dans les célèbres traités de Borelli et de Barthès, les solutions des problèmes de la course et du saut nous ont paru encore loin d'être atteintes; enfin, que les différens mouvemens de l'homme appliqués à des efforts extérieurs et même à son propre déplacement, méritent d'être examinés sous un nouveau jour. En conséquence, nous traiterons successivement, 1° de quelques mouvemens partiels du corps de l'homme; 2° de la marche; 3° du saut; 4° de la course; 5° de l'application de la force de l'homme à des efforts extérieurs.

DE QUELQUES MOUVEMENS PARTIELS DE L'HOMME.

170. Un genre particulier de lutte qui porte le nom de *boxe*, a été perfectionné en Angleterre au point de devenir un art aussi savant et peut-être plus difficile que l'escrime.

Dans ce genre de combat, des règles sévères défendent expressément toute espèce d'appréhension réciproque des combattans. Ils sont nus jusqu'à la ceinture, et ne doivent s'attaquer qu'en se frappant réciproquement du poing fermé, comme ils ne doivent parer ces coups qu'en y opposant leurs poings ou leurs bras.

Une des choses qui surprennent le plus les spectateurs inaccoutumés à ce genre de combat si célèbre dans les trois royaumes unis, est sans doute l'effet terrible et quelquefois mortel qu'un seul coup peut produire; on est encore plus étonné de la supériorité qu'un habile boxeur, quoique mince et assez faible, obtient toujours sur le plus robuste antagoniste.

En recherchant la cause de ces deux circonstances, on trouve qu'elle réside presque exclusivement dans l'art d'imprimer au poing le maximum de la vitesse possible, pour le moment où il atteint le corps de l'adversaire. L'ensemble des circonstances propres à déterminer ce résultat constitue un problème de mécanique animale qui n'est pas sans intérêt par lui-même, et qui aura du moins celui de la nouveauté.

Pour asséner un coup de poing de manière que la masse de la main soit animée de la plus grande vitesse possible, et puisse par conséquent produire le maximum de son effet dynamique, il faut, 1° que le corps soit solidement établi sur les extrémités inférieures, les pieds écartés d'avant en arrière, et les genoux légèrement fléchis; 2° que le tronc soit porté légèrement en arrière, et dans un état de torsion qui porte aussi en arrière l'épaule du bras dont on veut frapper; 3° que le bras soit lui-même porté en arrière autant que son articulation le permet; 4° que l'avant-bras soit fortement fléchi sur le bras, et la main sur l'avant-bras, jusqu'à toucher l'épaule.

Dans cette situation, s'il arrive que la main se redresse sur l'avant-bras, que l'avant-bras s'étende sur le bras, que le bras soit reporté en avant et que le tronc se tourne subitement de manière à rendre l'épaule droite antérieure; si ces différens mouvemens s'exécutent simultanément et avec promptitude, et si enfin la distance est calculée de manière à ce que le poing atteigne le corps de l'adversaire un peu avant le moment de l'extension complète du membre, le choc aura lieu avec la plus grande vitesse possible.

La vitesse imprimée à la main fermée devient très considérable dans le cas que je viens de décrire, pour deux raisons principales. La première, c'est que plusieurs vitesses s'ajoutent les unes aux autres pour se transmettre à la main; savoir : celle de l'épaule se portant en devant, celle du bras dans la même direction, celle de l'avant-bras s'étendant sur le bras, et enfin, quoique son importance soit minime, celle de la main s'étendant sur l'avant-bras. La seconde raison se trouve dans l'organisation de l'avant-bras; et en effet, cette partie du membre supérieur représente un levier dont les bras sont inégaux; celui auquel est attachée la main qui le prolonge encore, est très considérable, celui auquel est attachée la puissance du triceps est représenté dans la flexion, par la longueur peu considérable de l'apophyse olécrane; par cette simple disposition, il arrive déjà que la main est mue, dans l'extension de l'avant-bras, d'un mouvement rapide, quoique la contraction du muscle soit assez lente par elle-même; mais on conçoit que cette action continuée devient pour la main une puissance accélératrice. Enfin, pour compléter les conditions de vitesse dans un pareil mouvement, il arrive que la direction du muscle triceps s'approche d'autant plus du parallélisme avec l'avant-bras, que l'ex-

tension devient plus considérable; en sorte que le *moment* de la force extensive diminue pendant que la vitesse croît en proportion; d'où il résulte que le mouvement de la main est doublement accéléré dans l'extension de l'avant-bras.

Nous aurons ailleurs l'occasion de faire remarquer que l'exercice de la contraction musculaire est assez lent chez l'homme, beaucoup plus rapide chez d'autres animaux, et d'ailleurs variable suivant les individus ou leurs dispositions momentanées. C'est une faculté physique, propre, ainsi que beaucoup d'autres, à recevoir un grand développement par un exercice habituel bien dirigé.

D'après cette théorie, on cessera d'être surpris de l'évidente supériorité de certains hommes plus faibles, sur des adversaires plus robustes, dans la lutte qui nous occupe; car on voit que l'effet dynamique de la main fermée dépend de la quantité de mouvement, ou de la masse multipliée par la vitesse; que la masse ne saurait présenter que de légères différences d'un individu à un autre, tandis que le degré de vitesse est tout entier soumis à l'application d'un art dans lequel on se perfectionne par l'exercice.

L'investigation que nous venons de porter dans un art étranger à nos mœurs, le rapproche beaucoup plus qu'on ne l'aurait pensé au premier coup d'œil, de ce noble jeu de l'escrime, en si grand honneur parmi nous, et dans lequel la promptitude et la précision des mouvemens sont des conditions si nécessaires.

DE L'ACTION DE LANCER DES PROJECTILES.

171. C'est une action très commune que celle par laquelle nous lançons au loin quelque corps plus ou moins pesant,

soit pour atteindre un but, soit simplement pour lui faire franchir un espace plus ou moins considérable. Le jeu de balle, la paume, etc., et même le volant, sont des exercices de ce genre. Le simple jet de pierres suffit pour en développer la théorie.

Lorsque la pierre saisie est lancée directement par l'extension du membre supérieur, la théorie est exactement celle que nous avons donnée dans l'article précédent; et si l'on considère qu'une pierre ainsi lancée peut s'élever à 20 mètres de hauteur, que pour être portée à cette élévation, sa vitesse initiale en quittant la main doit être d'environ 20 mètres par seconde, on concevra quel choc violent peut produire, dans l'exemple qui nous a occupé d'abord, le choc de cette main elle-même, animée d'une pareille vitesse.

Le mode de projection dont nous venons de parler n'est pas celui à l'aide duquel on peut imprimer à un projectile, par la main seule, la plus grande vitesse. Si l'on saisit la pierre, que l'on imprime à tout le membre supérieur un mouvement rapide de circumduction, pour en faire une sorte de fronde, et qu'on abandonne la pierre au moment où la main remonte en parcourant ce cercle, c'est-à-dire à l'instant où la vitesse tangentielle se trouve verticale et dirigée de bas en haut, la pierre prendra une vitesse encore plus grande que dans le cas précédent.

Il arrive fréquemment, comme dans le renvoi d'une balle, que le corps est projeté au moment où, animé d'une grande vitesse, il vient frapper la main dans un sens opposé; la vitesse de projection profite alors de la réaction élastique suivant les lois que nous avons établies à l'article du choc des corps.

Il arrive enfin que la main se trouve armée d'un levier additionnel, tel que la raquette dans les jeux de la paume

et du volant; et dans ce cas non seulement la raquette ajoute à la vitesse de projection par sa longueur, mais encore elle favorise le rebondissement par la perfection de son élasticité.

On a cité comme un exemple remarquable de la vigueur d'un athlète de l'antiquité, la faculté dont il jouissait de lancer une bouteille vide aussi loin qu'un autre aurait lancé une bouteille pleine. Des physiologistes ont expliqué ce genre de mérite en prétendant que la masse plus considérable de la bouteille pleine était une occasion de développer plus complètement l'énergie de contraction des muscles, et si cette explication était juste, on lancerait toujours plus loin une grosse pierre qu'une petite, ce qui est directement contraire à l'expérience. La vérité est qu'un corps qui a peu de masse et beaucoup de volume, et c'est le cas d'une bouteille vide, perd rapidement son mouvement acquis, par l'effet de la résistance de l'air, en sorte qu'il faut lui imprimer une bien plus grande vitesse primitive pour lui faire parcourir la même distance. Il est certain, en effet, qu'il n'existe pas d'homme assez fort pour lancer un duvet à deux pieds de distance.

On peut remarquer encore que des pierres trop petites ne peuvent pas être lancées aussi loin que celles qui présentent une masse moyenne. Nous verrons, en parlant de la résistance des fluides élastiques au mouvement des corps, que cette différence tient à ce que les surfaces ne varient que comme les carrés des dimensions, tandis que les solidités varient comme les cubes de ces mêmes dimensions.

Il est une observation générale qui s'applique à tous les cas de projection, c'est la question de savoir si l'étendue possible de la projection au moyen du membre supérieur, par exemple, est limitée par le degré d'énergie ou d'in-

tensité de la contraction musculaire. La plupart des faits que nous venons de citer prouvent évidemment que ce n'est pas cette énergie qui limite la projection. En effet, il suffit d'ajouter à la longueur naturelle de l'avant-bras la longueur d'une raquette, pour augmenter beaucoup l'étendue de la projection ; ce secours additionnel, loin d'être avantageux à l'intensité de l'action musculaire, en exige au contraire un plus grand développement ; ce qui est augmenté par l'usage de cet instrument, c'est uniquement la vitesse finale de l'extension. Les muscles étaient donc capables d'une contraction plus énergique, mais ils étaient insusceptibles d'une contraction plus rapide.

Si la main seule est employée à renvoyer une balle arrivant sur elle avec une grande vitesse, cette balle sera projetée beaucoup plus loin qu'elle ne l'aurait été directement; un effet d'élasticité s'ajoute ici à l'effet d'impulsion, mais les muscles extenseurs ont dû résister d'abord au mouvement primitif, jusqu'à le détruire, puis développer encore la puissance projectile. Ils avaient donc en eux-mêmes une intensité de contraction musculaire supérieure aux besoins du maximum de projection qu'ils produisent seuls. Or, comme dans toutes communications du mouvement, la quantité de ce mouvement communiqué ne peut dépendre que de l'intensité de la puissance ou de sa vitesse; s'il est démontré que les muscles possèdent une intensité d'action supérieure à la quantité de mouvement qu'ils peuvent imprimer à un projectile donné, cette limitation ne pourra être due qu'aux bornes mêmes de la vitesse intrinsèque de la contraction musculaire. Nous trouverons, en traitant du saut, de nouvelles preuves et de nouvelles applications de ce principe.

On pourrait être surpris que la masse de la main, animée d'une quantité de mouvement qu'elle transmet à un corps,

ne communique pas une plus grande vitesse à une petite masse qu'à une grande; mais il est important de se rappeler, dans toutes les questions de ce genre, le principe de dynamique suivant. Quelle que soit la prépondérance de la masse d'un corps qui communique son mouvement à un corps d'une masse moindre, celui-ci ne saurait acquérir plus de vitesse que le premier, car, s'il se mouvait un instant un peu plus vite, il cesserait d'être en contact et ne pourrait plus recevoir d'impulsion.

On peut exprimer encore ce principe sous cette forme : tant que le corps qui communique le mouvement a moins de masse que celui qui le reçoit, il partage avec lui toute sa quantité de mouvement ; mais quand la masse de ce premier corps est prépondérante, il ne lui communique plus que sa vitesse.

Ainsi, le bras qui lance une pierre ne lui communique pas sa quantité de mouvement, mais seulement la *vitesse finale* de la main au moment de l'extension.

DE LA MARCHE.

172. Indépendamment des variétés qui dépendent de la grandeur des pas, de la rapidité de leur succession, de leur direction, des dispositions accidentelles du sol, etc., etc., différences qui ont été indiquées par tous les auteurs, la marche présente des variétés plus importantes et moins étudiées qui dépendent en quelque sorte de son mode; et, en effet, la marche grave et la marche théâtrale diffèrent essentiellement de celle qui a pour unique objet de transporter l'individu à une grande distance par une action soutenue et prolongée. Nous décrirons succinctement l'élément de la marche ou le pas, dans la marche grave, et

nous indiquerons ses importantes modifications dans la marche prolongée.

Dans la marche grave ou théâtrale, le tronc est dans une position à peu près verticale, et le pas s'exécute par la série d'actions suivantes : le corps s'incline légèrement sur le côté de l'un des deux membres, le droit, par exemple, jusqu'à ce que la verticale du centre de gravité tombe dans l'étendue de la plante du pied droit; alors le pied gauche est soulevé de terre, et porté en avant par les fléchisseurs de la cuisse sur le bassin. Ce membre gauche, quoique étendu, se trouve alors beaucoup trop court pour atteindre le sol dans la direction oblique qu'il a contractée, mais ce déplacement antérieur du membre suffit pour porter en avant le centre de gravité du córps, qui commence à tomber suivant un arc décrit par la tête du fémur du membre droit, autour de sa longueur comme rayon. Cette chute continue jusqu'à ce que le talon du pied gauche rencontre le sol, et dans ce moment où les deux pieds sont écartés l'un de l'autre, le centre de gravité du corps est situé d'autant plus bas que l'écartement des deux leviers qui soutiennent le corps est plus considérable. Dans cet état, les extenseurs du pied du membre droit élèvent ce pied sur l'extrémité des os du métatarse, poussant ainsi en haut, en avant et un peu à gauche le tibia, le fémur, le bassin, et conséquemment le centre de gravité du tronc; et comme cette impulsion se communique directement au côté droit du bassin, celui-ci en éprouve un léger mouvement de rotation en avant, autour de la tête du fémur gauche comme centre. Cette impulsion du membre droit continue jusqu'au moment où la verticale du centre de gravité vient tomber dans l'étendue de la plante du pied gauche, et même vers la partie antérieure de cet espace; alors le membre droit resté en arrière peut quitter le sol

sans compromettre la station, et être non seulement rapproché du pied gauche, mais immédiatement porté en avant, mouvement qui fait tomber de nouveau le centre de gravité jusqu'au moment où le talon du pied droit rencontre le sol.

Observons que le pied porté en avant peut poser immédiatement sur le sol par toute sa plante, si l'on a le soin de le présenter dans une extension convenable. C'est ce que font les soldats qui marchent au pas dans l'exercice.

Dans les mouvemens très complexes que nous venons de décrire, le centre de gravité du corps éprouve des abaissemens et des élévations successifs, en même temps qu'il est transporté d'un côté à l'autre à chaque pas, et qu'il se meut parallèlement au sol; en sorte que son mouvement total serait assez bien exprimé en projection verticale par une ligne ondulée, comme on le voit dans la *fig.* 1re., et en projection horizontale par un ligne anguleuse, comme on le voit dans la *fig.* 2, *pl.* V.

Il était assez intéressant d'apprécier la quantité dont le centre de gravité tombe et se relève dans un pas ordinaire, et nous avons trouvé, par une suite de mesures, que cette quantité était d'environ $0^{m},022$; d'où il suit qu'indépendamment des efforts musculaires employés à soulever et à transporter en avant successivement les deux membres inférieurs, et de ceux indispensables pour maintenir l'équilibre de station dans toutes les parties du corps, l'homme qui marche en faisant, par exemple, un pas par seconde, élève 60 fois, dans une minute, un poids de 75 kilogrammes à $0,022^{m}$, ou $75^{kil.}$ à $1^{m},32$ de hauteur par minute, ce qui donne une évaluation assez précise de la quantité de puissance déployée dans la marche.

Il s'en faut de beaucoup que les différentes parties que nous avons si soigneusement distinguées dans le pas soient

effectivement ainsi séparées ; toutes ces parties d'un même mouvement se fondent en quelque sorte les unes avec les autres, et il en résulte un mouvement composé et continu qui n'admet pas d'intervalle sensible entre ces différens temps. Il y a cependant des parties essentielles de l'action composée que l'on nomme un pas, qui demeurent distinctes, quoi qu'on puisse faire pour l'éviter ; ainsi, on ne saurait marcher du pas grave que nous avons décrit sans que le talon de chaque pied produise sur le sol un choc plus ou moins bruyant ; ce qui prouve clairement que dans cette sorte de marche, la chute du centre de gravité est une condition indispensable.

La marche, considérée dans les cas où elle doit être soutenue pendant long-temps, par exemple, chez le soldat dans une longue route, ou chez tout autre voyageur pédestre, a des caractères tout différens de ceux que nous venons de décrire. Le tronc est fléchi en avant, de façon que le centre de gravité ait une tendance continuelle à tomber dans cette direction. Chaque pas semble avoir alors pour objet de porter un des membres en avant pour prévenir cette chute du centre de gravité. Le membre resté en arrière n'a presque aucun effort à faire pour soulever et pousser en avant ce même centre de gravité, qui ne fait que se transporter alternativement d'un membre sur l'autre. Cette sorte de démarche exige absolument que les deux genoux soient légèrement fléchis ; elle ne comporte pas des ondulations verticales aussi prononcées que la première, mais elle produit des oscillations transversales beaucoup plus marquées.

On pourrait croire que dans ce nouveau mode de la marche, la quantité d'action musculaire dépensée serait beaucoup moindre, mais il faut prendre garde qu'une partie du poids du tronc, penché en avant, doit être con-

tinuellement soutenue par les extenseurs de l'épine, et que les extenseurs du genou ont à s'opposer aussi continuellement à l'augmentation de leur flexion; en sorte que, tout compensé, le somme de force musculaire employée reste à peu près la même, seulement elle se partage entre un plus grand nombre de muscles, et devient ainsi moins fatigante et plus facile à produire. Le sentiment de lassitude se fait principalement sentir dans les lombes et dans les cuisses.

L'action de marcher sur la pointe du pied en évitant le bruit, exige impérieusement que le tronc soit penché en avant, car le centre de gravité ne peut plus être alors poussé d'arrière en avant par l'extension du pied sur la jambe.

Rien n'est plus propre à éclairer sur la réalité des divers mouvemens dont nous avons dit que le pas était composé, que l'observation des variétés de la démarche dans les difformités ou lésions accidentelles dont certains individus sont affectés. Ainsi un homme qui a deux jambes de bois ne saurait marcher qu'en penchant le tronc en avant et balançant son corps d'une jambe sur l'autre. Il en est de même de ceux qui sont montés sur des échasses; tous deux sont privés de l'extension du pied, qui servirait à pousser leur centre de gravité en avant. Chez la femme, le balancement transversal et les mouvemens de rotation du bassin sont plus prononcés que chez l'homme, parce que les cavités cotyloïdes sont plus écartées l'une de l'autre. Chez le boiteux, les extenseurs du pied du membre plus court se fatiguent rapidement parce qu'ils ont l'office de relever à chaque pas le centre de gravité d'une chute plus considérable, et pour leur en faciliter l'action, le tronc s'incline du côté opposé. Si le sol s'élève en pente plus ou moins rapide, le centre de gravité doit être relevé à chaque

pas du sinus de l'angle d'inclinaison de ce plan, et la fatigue s'en accroît : elle se fait principalement sentir dans les extenseurs des pieds. Lorsque le sol va en descendant, la secousse causée par la chute du centre de gravité à chaque pas répond dans les cavités cotyloïdes et y produit bientôt des douleurs vives. Pour diminuer cet effet, les genoux sont à demi fléchis, pour faire office de ressort, et les extenseurs de la jambe se fatiguent promptement, etc., etc.

On pourrait croire que l'action de soulever à chaque pas le membre resté en arrière pour le porter en avant, serait de peu d'importance dans la fatigue d'une longue marche. Nous avons cependant été à même de nous assurer du contraire, en parcourant à pied les montagnes de la Suisse. Nous observâmes que nous éprouvions une fatigue beaucoup plus considérable que celle de nos guides et hors de proportion avec nos forces relatives; mais, en y prenant garde, nous vîmes qu'à chaque pierre trouvée sur la route, nous élevions le pied pour la franchir, tandis que nos guides l'évitaient par un mouvement de circumduction; et l'adoption de cette méthode nous mit bientôt à même de supporter une plus longue route.

Il suit naturellement de la théorie de la marche que nous venons d'exposer, que la disposition angulaire des leviers à l'aide desquelles elle s'exécute, est fort désavantageuse à l'emploi des forces qui la produisent, puisqu'au lieu d'une translation horizontale, qui en est le but, il se produit des chutes successives et des ascensions correspondantes qui n'ont pas d'effets utiles pour la translation horizontale ; des leviers circulaires ou des roues proprement dites ne présentent point cette cause de déperdition de force ; en effet, un homme supporté par un appareil de ce dernier genre, peut se transporter plus vite et plus loin en appliquant à mouvoir cet appareil une faible partie de sa puis-

sance musculaire, pourvu toutefois que le sol dur et uni se prête au développement des roues, et que les frottemens dans leurs axes ne soient pas trop considérables, c'est ce dont on peut se convaincre en essayant la machine nommée *vélocipède*, et dans laquelle la force de l'homme est pourtant bien désavantageusement appliquée, puisqu'elle ne s'exerce que par une sorte de friction des pieds sur le sol, aucun doute que cette machine perfectionnée ne devienne un moyen de transport très avantageux.

DU SAUT.

173. La véritable théorie du saut, c'est-à-dire la juste application des lois de la mécanique à cette action par laquelle le corps d'un animal est séparé du sol sur lequel il reposait, pour être lancé dans l'espace à l'instar d'un projectile, est un des problèmes les plus intéressans que l'anatomie et la physiologie puissent soumettre à la physique. Ce problème n'est certainement pas sans quelques difficultés, puisque Borelli, auquel personne ne conteste le grand mérite de son traité *de Motu animalium*, n'en a donné qu'une solution fort incomplète et même erronée dans plusieurs points. C'est inutilement que le célèbre Barthès appliquant une rare sagacité et une érudition profonde à un sujet qui réclamait surtout des connaissances précises en mécanique, a combattu Borelli et a cherché à établir ce qu'il appelle la nouvelle et véritable théorie du saut. Ses explications sont encore plus vagues, ses erreurs plus graves, sa solution plus incomplète.

La plupart des physiologistes ont depuis ces deux auteurs adopté ou seulement relaté leurs opinions, tout en indiquant le besoin bien senti de considérations plus exactes sur un sujet tout mathématique.

On ne peut s'empêcher d'éprouver un sentiment de surprise, en cherchant inutilement dans les auteurs qui ont traité ce sujet, les considérations de vitesse de masse et de quantité de mouvement qui sont les véritables élémens du problème.

Nous tenterons la solution de ce problème, quoiqu'elle soit insusceptible d'une application rigoureuse du calcul; nous aurons beaucoup fait si nous indiquons avec exactitude quelles sont les lois de ce phénomène et de quelle nature d'influences il reçoit ses modifications.

Le premier point à considérer dans le sujet qui nous occupe, est sans contredit la force qui produit le saut ou la contraction musculaire. Cette puissance ne se prête point au calcul, son intensité ne suit point la raison des masses musculaires en action, elle semblerait plutôt sous la dépendance de l'influence nerveuse, dont le degré est lui-même impossible à apprécier. Mais il est souvent dans ces puissances vitales elles-mêmes qui paraissent de nature à déjouer toutes tentatives d'applications mathématiques, des modes ou des manières d'être qui sont leurs véritables lois, et qu'il devient fort important d'établir quand on veut juger sainement des effets mécaniques qu'elles produisent.

La puissance de contraction d'un muscle est évidemment le résultat du rapprochement des deux extrémités du chacune de ses fibres, soit qu'en effet cette fibre se raccourcisse, soit, comme semblaient l'indiquer les recherches de MM. Prevost et Dumas, que leurs directions droites deviennent fluxueuses en formant des angles alternatifs dont les sommets répondent au passage des filets nerveux.

Ce rapprochement se fait avec une intensité d'action très variable, mais sa vitesse ne l'est pas moins; on peut cependant remarquer que chez l'homme cette vitesse de contrac-

tion, que nous appellerons vitesse intrinsèque de la force musculaire, est extrêmement bornée.

Il y a peu de circonstances dans la structure du corps de l'homme où l'on puisse juger directement de la vitesse avec laquelle un muscle se contracte. Il est d'ailleurs nécessaire que sa puissance de contraction n'ait point de masse sensible à mouvoir, auquel cas l'importance de cette masse modifierait la vitesse apparente.

On peut néanmoins s'assurer que dans le rapprochement de l'humérus du tronc la puissance du grand pectoral ne saurait imprimer à son point d'attache une vitesse de plus de six à huit pouces par seconde.

L'élévation du corps sur la pointe des pieds, ou mieux l'extension du pied sur la jambe, semble offrir encore une vitesse moindre.

Dans les cas même où l'habitude a développé au plus haut degré possible la rapidité de la contraction musculaire, elle demeure extrêmement bornée, ce dont on peut s'assurer en comptant le nombre de battemens que le plus habile pianiste peut produire en une seconde lorsqu'il exécute une cadence, et considérant combien est petit l'espace parcouru à chaque mouvement par les fléchisseurs des doigts disposés presque parallèlement aux leviers qu'ils meuvent.

On trouverait au besoin la meilleure de toutes les preuves de la limitation nécessaire de la vitesse intrinsèque de la force de contraction dans la structure générale du corps de l'homme. On voit partout la nature employer la différence de longueur des bras de levier, ou la direction sous des angles très aigus des forces qu'elle leur applique, dans les cas où elle avait besoin de vitesse dans les mouvemens. Elle paraît au contraire disposer avec une sorte de profusion de l'intensité de la puissance musculaire, qui semble aussi peu limitée que sa vitesse intrinsèque est restreinte.

Les animaux diffèrent sans doute à un très haut degré les uns des autres sous le point de vue de la vitesse de la force musculaire. Peut-être existe-t-il un rapport direct entre cette valeur et les dimensions de leurs corps et la durée de leur vie. Le moucheron, l'animal qui ne vit qu'un jour, doivent nécessairement jouir de la faculté de répéter bien fréquemment des actes qui doivent s'accumuler en si grand nombre dans un si court espace de temps, et leur courte existence s'accommoderait bien mal de la lenteur des déplacemens de nos volumineux quadrupèdes. On peut même obtenir une preuve physique du fait que nous avançons. L'aile d'un moucheron a dans le rapport de longueur de ses bras de levier quelque analogie avec les ailes de nos grands oiseaux; et néanmoins le battement de ses ailes produit dans l'air un son appréciable et même fort aigu, qui ne saurait appartenir qu'à une très grande vitesse dans ses mouvemens, soit qu'on attribue ce son à une action pareille à celle des hanches, soit qu'on l'explique par la rentrée de l'air dans le vide précédemment occupé par le corps qui se meut.

Nous ne savons pas que cette différence remarquable dans la vitesse intrinsèque de la contraction musculaire ait été prise en considération par aucun de ceux qui se sont occupés du saut chez les animaux. Elle nous suffira cependant pour expliquer un grand nombre de phénomènes attribués jusqu'ici sans probabilité à l'intensité de cette même puissance, et nous établirons bientôt sur des preuves positives ce principe : *que la contraction musculaire n'est susceptible chez l'homme que d'une vitesse très limitée.*

Pour établir avec quelque précision la théorie du saut dans les circonstances très variables où il peut s'opérer, il est absolument indispensable d'en distinguer deux espèces:

nous qualifierons la première de *saut vertical*, et nous nommerons la seconde *saut tangentiel.*

DU SAUT VERTICAL.

174. Ce mouvement, en vertu duquel le corps d'un animal, celui de l'homme par exemple, est lancé de bas en haut avec assez de vitesse pour contrebalancer et surmonter les effets de la pesanteur, de manière à séparer du sol les parties les plus inférieures de son corps, est toujours le résultat de l'extension de plusieurs leviers d'abord fléchis sous des angles plus ou moins aigus, et qui à la fin de l'action sont tous situés dans une même ligne droite. Cette espèce de saut peut être plus ou moins complet, c'est-à-dire que les leviers peuvent être plus ou moins rapprochés de la ligne droite commune, ou complètement ramenés dans cette unique direction. Nous supposerons d'abord l'extension complète.

Chacune des articulations fléchies dans les angles alternatifs que forment les membres pliés avant l'action du saut est entourée d'un appareil musculaire varié, dont l'objet principal est l'extension. Tantôt les muscles sont attachés aux membres supérieurs, et semblent destinés à mouvoir celui qui est au dessous; tantôt la disposition est inverse: mais dans tous les cas les effets de la puissance étant nécessairement réciproques sur les deux leviers qu'elle peut mouvoir, il nous est permis de négliger les dispositions particulières de l'appareil musculaire, et de considérer les extenseurs comme des forces ayant pour effet d'ouvrir les angles de flexion des leviers entre eux.

Les membres de l'homme qui concourent à produire le saut sont assez bien représentés (*pl.* V, *fig.* 3) par les lignes AC, B C et C D, tandis que la ligne DE représenterai

la direction du tronc. De plus, afin d'éclaircir notre langage, nous nommerons angle de redressement celui que forme chacun des leviers avec la verticale menée de bas en haut, à partir de son extrémité inférieure, en sorte que nous aurons dans la figure indiquée les quatre angles de redressement α; β, γ, λ.

Considérant d'abord géométriquement le changement de figure qui surviendra quand tous les angles de redressement seront égaux à o, c'est-à-dire quand tous les leviers seront dans la même verticale, nous trouvons que le point B se sera élevé d'une quantité égale au sinus verse de l'angle α, que le point C se sera élevé d'une quantité égale à la valeur du sinus verse de α, plus celle du sinus verse de β; en sorte que si nous cherchions une expression algébrique de l'espace qui aurait été parcouru par le point E, nous trouverions, en désignant chaque levier servant de rayon aux angles de redressement par les lettres A, B, C, D, et nommant e l'espace cherché, $e =$ A sin. ver. α + B. sin. ver. β. + C sin. ver. γ.

Il résulte de cette formule, 1° que pour chaque levier considéré successivement de bas en haut, l'espace parcouru dans la verticale, et par suite du redressement, est en raison directe du nombre des leviers placés au dessous de lui; 2° que cet espace est en raison des longueurs de chacun de ces leviers; 3° que cet espace est proportionnel aux sinus verses des angles de redressement. Les deux premières conséquences n'exigent aucune explication; la troisième au contraire mérite un développement particulier.

D'abord les sinus verses croissant et décroissant en même temps que les angles, il en résulte que plus les angles de redressement seront grands, et plus le chemin parcouru par le point E, par exemple, sera considérable. Mais d'une autre part les sinus verses ne croissent et ne décroissent

pas dans la même raison que les angles; et, par exemple, dans le cas qui nous occupe, en supposant que le levier AB passe de la situation horizontale à la situation verticale, le sinus verse de cet angle de 90 degrés sera la longueur même du levier, tandis que pour un redressement de 60 degrés, le sinus verse ne sera déjà plus que la moitié du rayon; en sorte que les sinus verses qui expriment les élévations, décroissant bien plus rapidement que les angles, la somme totale de l'ascension du point E sera dans une raison beaucoup plus rapide que la proportionnalité des angles; que, par exemple, pour une flexion double des leviers entre eux, l'espace parcouru pourra être plus que triplé; de manière encore que, pour de légères flexions des leviers entre eux, le chemin parcouru sera extrêmement petit; qu'enfin, pour une flexion infiniment petite, l'élévation serait un infiniment petit du second ordre.

Pour première conséquence de cette valeur de e en fonction des sinus verses, nous dirons que dans la fermeture successive des angles de flexion, depuis 90 degrés, par exemple, jusqu'à zéro, les chemins parcourus par le point E pour un même nombre de degrés de fermeture de ses angles vont en décroissant suivant la raison même du décroissement des sinus verses.

Après avoir ainsi posé la partie géométrique du problème, il convient d'abandonner les considérations purement linéaires, et d'examiner, en supposant des leviers pesans, quel genre de mouvement ces leviers pourront acquérir pendant l'extension, et conserver après l'extension complète.

Quant au premier levier A B, nous dirons que le point A pressé contre le sol par la force d'extension qui agit en B, maintenu par les frottemens sur ce même sol, et chargé d'ailleurs de la masse pondérable de tout l'appareil, doit

être considéré comme un point fixe; que dès lors tous les points du levier A B, quelles que soient les impulsions qu'ils reçoivent, ne sauraient se mouvoir que dans des arcs de cercle; qu'en conséquence chacun de ces points sera animé, au moment de la situation verticale, de vitesses tangentielles qui conséquemment seront toutes horizontales; en sorte que, si un obstacle quelconque venait à détruire ces vitesses horizontales, il ne saurait rester dans ce levier pesant aucune vitesse ascensionnelle quelconque. Il est de la même évidence que ces vitesses tangentielles ne peuvent concourir utilement avec aucune autre puissance pour produire une résultante verticale.

Considérant à son tour le second levier B C, nous reconnaîtrons avec Barthès que dans le redressement simultané des deux leviers A B et B C, ce dernier exécutera un mouvement de rotation autour d'un centre variable, de telle façon, qu'arrivé à la direction verticale, son extrémité B se trouvera animée d'une vitesse tangentielle dans un sens, pendant que son extrémité C sera animée d'une vitesse tangentielle dans le sens contraire. Nous disons que ces deux vitesses seraient horizontales si le centre des mouvemens avait été fixe, et qu'elles seraient par conséquent sans résultante verticale possible; mais nous remarquons que pendant ce mouvement de rotation, l'extrémité B de ce levier s'est élevée de la valeur du sinus verse α, et qu'en conséquence la masse pondérable du levier B C a été élevée de cette quantité, et conserverait une vitesse ascensionnelle exprimée par cette valeur, dans le cas où un obstacle quelconque détruirait les vitesses tangentielles dont ces différens points sont animés au moment où il devient vertical.

Des raisonnemens tout à fait semblables s'appliquent au levier C D. Or il arrive dans la structure des membres inférieurs de l'homme, que les extensions des leviers angu-

laires qui concourent au saut sont limitées à la ligne droite par des obstacles insurmontables, en sorte que dans l'extension complète toutes les vitesses tangentielles, résultats des mouvemens de rotation, sont nécessairement détruites ; d'où nous devons conclure que chaque masse pondérable qui concourt à la production du saut est animée, au moment de l'extension complète, d'une vitesse ascendante proportionnelle à la somme des sinus verses des angles de redressement sous-jacens.

En comparant cet exposé avec ce qu'ont dit sur le même sujet Borelli et Barthès, on trouve que le premier s'exprimait peut-être avec inexactitude, en supposant que le sol produisait un mouvement réfléchi, puisqu'il ne saurait fournir qu'un point fixe aux puissances motrices. On trouvera aussi sans doute qu'il a employé une expression vague et inexacte, en disant que les vitesses de rotation opposées se combinent pour produire une résultante verticale. Quant à Barthès, il est évident qu'il a affirmé un fait inexact, en soutenant que deux angles de flexion opposés sont indispensables pour produire le saut. Il se serait mieux exprimé en disant qu'un levier seul ne pouvait prendre des vitesses ascensionnelles, et que chaque levier recevait toujours ce genre d'impulsion des leviers placés au dessous de lui. On voit pourtant qu'il a pressenti la véritable cause du mouvement ascensionnel, lorsqu'il dit que le second levier ne devient susceptible de ce genre de vitesse qu'au moment où son extrémité inférieure cesse d'être un point fixe.

Après avoir déterminé les valeurs d'où dépendent les vitesses ascensionnelles, et avoir démontré qu'elles vont en croissant à partir de la vitesse du premier levier qui est zéro, il nous reste à remarquer qu'au moment de l'extension complète, et malgré l'inégalité des espaces parcourus jusque là, les différens leviers pesans étant liés entre eux,

il faut nécessairement que le système prenne une vitesse commune, dont la valeur dépendra du nombre et du rapport des vitesses partielles, et sera également influencée par les rapports des masses dont il devient nécessaire de nous occuper.

Dans l'action de sauter, considérée chez l'homme, les masses pondérables des différens leviers fléchis vont en croissant rapidement de bas en haut. Le premier levier représente le pied dont la masse est très petite; le second levier représente la jambe, et le troisième, la cuisse, dont les poids vont en croissant; mais le quatrième représente le tronc qui supporte la tête, et auquel les bras sont attachés, et cette réunion de parties représente environ les deux tiers du poids du corps.

En réunissant ces circonstances à celles qui regardent la vitesse, on voit que le pied a une vitesse nulle, et une très petite masse; la jambe une vitesse médiocre à cause du peu de longueur du premier levier, et une masse également médiocre; que la cuisse, dont la masse est assez considérable, est déjà animée d'une vitesse d'autant plus grande que la jambe a plus d'étendue, et que le genou est susceptible d'une flexion très prononcée. Enfin il est évident que le tronc avec ses appendices, présentant la masse prépondérante, est aussi animé de la vitesse maximum. Toutes ces conditions sont également favorables à la répartition qui va se faire entre ces masses pour produire une vitesse commune ascensionnelle; et en effet la vitesse du pied est zéro, mais son poids n'est qu'environ un centième de celui du corps, et par conséquent la nécessité de lui faire partager la commune vitesse ne diminuera celle-ci que d'un centième. Le tronc et les cuisses ayant presque la même vitesse, la grande masse de ces dernières diminuera fort peu la vitesse du tronc, etc

On peut faire quelques suppositions probables sur les poids relatifs et les vitesses relatives des différentes parties du corps, par exemple. On peut admettre que

Le tronc et les appendices pèsent......	100
Les cuisses........................	30
Les jambes.........................	15
Les pieds..........................	5

D'un autre côté, si le maximum de vitesse ou celle qui appartient au tronc est représentée par...... 100

Celle des cuisses par................	60
Celle des jambes par.................	30
Celle des pieds par..................	0

en appliquant la formule $u = \frac{m v + m'v'}{m + m'}$, c'est-à-dire en multipliant chaque masse par sa vitesse propre, et divisant la somme de ces produits par la somme des masses, on trouvera que la vitesse commune de tout le corps sera 81.

Ces considérations sur les masses et les vitesses relatives, communiquées d'abord aux différentes parties du corps, pour se changer ensuite en une vitesse commune, toujours moindre que celle du tronc, auraient assez peu d'importance, si elles ne fournissaient la véritable raison d'un grand nombre de faits, autour desquels on a vainement rassemblé les suppositions les moins raisonnables, sans réussir à en rendre compte. Nous examinerons successivement quelques uns de ces cas particuliers.

Les anciens étaient dans l'usage de saisir dans leurs mains des poids additionnels, connus sous le nom de *halters*, ou de les attacher sur leurs épaules ou sur leur tête comme un moyen de sauter à une plus grande hauteur. Barthès suppose que ces poids étaient une occasion

de développer l'entier effet de la puissance des muscles, qui, déjà chargés de tout le poids du corps, n'ont sûrement pas besoin de ce genre d'excitation; mais il est évident qu'une masse quelconque ajoutée à celle des masses mobiles qui prend la plus grande vitesse accroît nécessairement la moyenne ou la vitesse commune, pourvu que les muscles puissent élever ce surcroît de fardeau d'un mouvement aussi rapide, ce qui ne manquera pas d'arriver, attendu qu'en pareil cas ce n'est pas l'intensité de l'action musculaire qui apporte des limites au saut, mais seulement la vitesse de cette contraction, ainsi que nous le démontrerons très incessamment. Il est d'ailleurs évident par le raisonnement, et prouvé par l'expérience, que les mêmes poids attachés aux pieds diminuent considérablement la hauteur à laquelle un homme peut s'élever en sautant.

En continuant, à l'occasion de ces poids additionnels, l'application numérique que nous faisions tout à l'heure, on trouvera que si 10 livres sont ajoutées au poids du tronc, la vitesse commune sera portée à 83 au lieu de 81; et en se servant du principe que les hauteurs auxquelles s'élève un projectile sont proportionnelles au carré des vitesses de projection, on trouvera que la hauteur du saut sera dans ce cas augmentée de 0,05. Si les 10 livres sont ajoutées aux pieds au lieu de l'être au tronc, la vitesse moyenne sera réduite à 76, et la hauteur du saut sera diminuée de 0,17.

On observe qu'à l'instant où un homme exécute le saut vertical, il écarte et élève rapidement ses deux bras pour les rabaisser immédiatement par un mouvement contraire. Ce phénomène, assez compliqué, est digne d'une sérieuse attention, d'autant plus que sa véritable théorie trouve son application dans tous les cas où les membres supérieurs se meuvent avec agilité pour aider la locomotion générale.

Au moment qui précède immédiatement le saut, et lorsque les pieds ont encore leur point d'appui sur le sol, les bras peuvent être élevés rapidement par les muscles de l'épaule, sans rien ôter à la vitesse future du système commun; mais au moment où la masse du corps devient un projectile, les masses pondérables de ses deux bras se trouvent animées, 1° de la vitesse du tronc; 2° de leur vitesse propre d'ascension par rapport au tronc, et conséquemment ils accroissent d'autant la moyenne de toutes les vitesses, pourvu toutefois qu'ils soient subitement fixés au tronc et qu'ils ne puissent plus s'élever sans lui, ce qui est produit par la contraction subite des abaisseurs, à défaut de quoi les bras continueraient à s'élever plus vite et plus haut que le tronc, sans profit pour la moyenne de toutes les vitesses.

En continuant nos exemples numériques, si nous supposons que les bras aient une masse égale à 20, et que cette masse puisse être animée, outre leur vitesse commune avec celle du tronc, d'une autre vitesse égale à 100, nous trouverons,

Pour le tronc,	masse, 80;	vitesse, 100
Pour les bras,	masse, 20;	vitesse, 200
Pour les cuisses,	masse, 30;	vitesse, 60
Pour les jambes,	masse, 15;	vitesse, 50
Pour les pieds,	masse, 5;	vitesse, 0

Ce qui donne une vitesse moyenne de 95, et, pour la hauteur possible du saut, une augmentation de près de 0,30.

On conçoit que les halters saisis dans les mains, et placés à l'extrémité d'un long bras de levier, constitueront des masses accessoires, animées d'abord d'une grande vitesse ascensionnelle particulière, qui accroîtra d'autant la commune au moment de la fixation des bras.

Le dernier degré de perfection de l'influence de ces halters sera sans doute de les abandonner, une fois l'impulsion produite, puisqu'alors ils cesseront, précisément au moment opportun, de faire partie du poids total du corps, qui va devenir la cause retardatrice de la vitesse ascensionnelle; c'est en effet ce qui se pratiquait communément chez les anciens.

En considérant la figure qui nous a servi à chercher les élémens du saut vertical, on peut voir que l'angle de redressement du levier DE est très petit, et que son sinus verse est presque nul. Il arrive en effet que le corps est faiblement incliné en avant dans l'action de sauter, et l'on pourrait même nier l'utilité de cette flexion qui n'ajoute rien à la vitesse ascensionnelle. Cependant cette flexion est absolument indispensable à l'action de sauter, et en voici la raison.

Nous avons dit que l'action des extenseurs était réciproque sur les deux leviers dont ils ouvrent l'angle : en conséquence, si le tronc était vertical au moment de l'ouverture de l'angle, qui a son sommet dans l'articulation coxo-fémorale, ce tronc serait porté en arrière et perdrait sa direction verticale nécessaire. S'il a été incliné, au contraire, il est redressé par l'ouverture de l'angle coxo-fémoral. Cette inclinaison n'a pas besoin, du reste, d'être fort étendue, parce que les vitesses étant réciproques aux masses, le tronc se redresse peu lorsque le fémur se redresse beaucoup.

Nous n'avons considéré jusqu'ici les vitesses transmises aux différentes parties du corps, dans l'action de sauter, que d'une manière comparative. Il est temps de nous en occuper sous le point de vue de leur valeur absolue.

Les principes qui doivent nous diriger sont évidemment ceux qui président au mouvement des projectiles. La loi

qui nous importe le plus est exprimée dans la formule $h=\frac{E^2}{4a}+\frac{\theta^2}{t}$, formule dans laquelle h est la hauteur d'où un projectile est tombé, E l'espace qu'il a parcouru d'un mouvement uniforme pendant le temps t, a l'espace que la pesanteur fait parcourir au corps dans un temps θ, θ le temps pendant lequel le projectile s'est mu par l'action de la pesanteur.

Nous pouvons simplifier cette formule pour notre usage du moment, en faisant θ et t égaux à l'unité, ce qui donnera $4a$ égal au nombre constant $19^m,6$, ce qui veut dire que la hauteur d'où un corps pesant sera tombé sera égale au carré de l'espace qu'il parcourrait uniformément en une seconde, divisé par $19^m,6$; et comme la vitesse finale après une chute est précisément celle dont un projectile doit être animé pour retourner, contre l'action de la pesanteur à la hauteur dont il était parti, il s'ensuit que nous pouvons prendre h pour expression de la hauteur verticale à laquelle s'élèverait un projectile, animé d'abord d'une vitesse uniforme qui lui ferait parcourir un espace E par seconde.

On voit par cette formule que les valeurs de h sont directement proportionnelles au carré de la vitesse uniforme.

Cela posé, si l'action du saut imprimait à la masse du corps une vitesse moyenne de $9^m,8$ par seconde, le centre de gravité de ce corps pourrait s'élever dans l'air à $4^m,9$; si cette vitesse était de $4^m,9$ par seconde, le corps pourrait s'élever à $1^m,22$; si cette vitesse était de 2,4, le corps ne serait élevé qu'à 0,3; si cette vitesse était de 1,2 par seconde, l'ascension du corps serait réduite à $0^m,07$; et enfin si cette vitesse était de 0,6, l'ascension serait réduite à $0^m,019$.

Connaissant la loi des hauteurs ascensionnelles, il nous reste à rechercher quel peut être l'espace que l'extension fait parcourir à la masse du corps, et dans quel temps cet espace peut être parcouru.

La moyenne de plusieurs mesures donne environ $0^m,4$ pour la quantité dont le centre de gravité du corps peut être rapproché du sol, dans les flexions qui précèdent le saut, et par conséquent $0^m,4$ est l'espace que les forces musculaires peuvent faire parcourir à ce centre de gravité avant que le corps devienne un projectile.

La première question qui se présente est de savoir si cet espace est parcouru d'un mouvement uniforme ou plus ou moins accéléré; et d'abord la contraction musculaire qui ouvre les angles de flexion des leviers, pouvant agir pendant toute la durée de l'extension, peut devenir une force accélératrice; en sorte que les arcs décrits par les extrémités des leviers fléchis sont effectivement parcourus avec des vitesses accélérées; mais comme d'une autre part ce ne sont pas les longueurs de ces arcs qui donnent les espaces parcourus, mais bien leurs sinus verses, dont les grandeurs pour un même nombre de degrés des arcs diminuent suivant une progression très rapide, il s'ensuit que l'accélération primitive doit être en grande partie compensée, et peut être entièrement détruite.

Si l'on considère en outre que $0^m,4$ est l'espace parcouru par le centre de gravité du tronc, et que la vitesse acquise par cette masse sera diminuée au moment du saut par les vitesses moindres des masses inférieures, on verra que l'on ne risque pas de commettre une grande erreur, en supposant que l'espace $0^m,4$ est parcouru d'un mouvement uniforme.

S'il en est ainsi, pour que l'ascension du corps s'élève seulement à $0^m,3$, il faudra que le mouvement d'exten-

sion totale s'exécute en $\frac{1}{6}$ de seconde; que, pour élever le corps à 1,22, il faudra que le même mouvement ne dure que $\frac{1}{12}$ de seconde; et qu'enfin, si cette extension complète de tous les membres inférieurs durait seulement $\frac{2}{3}$ de seconde, le saut n'élèverait le centre de gravité du corps qu'à $0^{m},019$, quantité inappréciable et susceptible de se perdre entièrement dans la mollesse et l'extensibilité des organes.

Telle est la solution naturelle de cette question, posée par Borelli. Comment se fait-il que dans le redressement du corps avec une vitesse modérée il n'y ait point de saut apparent produit?

Nous avons avancé que l'intensité de la force musculaire n'était pas la cause ordinaire de la limitation du saut dans l'homme, mais que cette limitation tenait essentiellement à la vitesse intrinsèque bornée de sa contraction musculaire; nous en trouverons la preuve en examinant ce qui se passe lorsque le saut est exécuté sur un sol élastique.

Nous établirons d'abord que l'élasticité du sol ne saurait être d'aucun avantage pour un saut unique, et qu'elle diminuerait même la hauteur d'ascension. En effet, au moment de l'extension des leviers, la réaction sur le sol est nécessairement égale à l'action sur la masse pondérable du corps. Cette action dure jusqu'au moment où, la projection commençant, le corps est séparé du sol; et en conséquence son retour à sa figure première, où son effet élastique, viendra toujours trop tard pour y concourir; mais cependant le chemin parcouru par le sol élastique dans sa flexion viendra en déduction du mouvement ascensionnel, et diminuera la valeur de h.

Il en est tout autrement lorsque les sauts sont répétés, ou lorsque le corps de l'homme détermine en tombant la flexion d'un sol élastique, dont le retour peut coïncider

avec une nouvelle extension des membres, et ajouter sa vitesse propre à celle que la masse du corps peut acquérir par ses propres forces. Si, par exemple, le corps était tombé de $0^m,3$ en chute libre sur un sol élastique et flexible, et qu'au moment du retour élastique les extenseurs imprimassent au corps une vitesse de $2^m,4$, cette fois la masse du corps serait élevée à $0^m,6$; et si cette action se répétait une seconde fois, l'élévation serait de $1^m,2$, une troisième de $2^m,4$, une quatrième de $4^m,8$. On peut observer ce genre de phénomène chez les danseurs de corde, qui, par des oscillations successives de la corde sur laquelle ils reposent, parviennent à lancer leurs corps à des hauteurs très considérables, quoiqu'à chaque fois ils ne fassent pour sauter que des efforts assez médiocres.

Il est généralement reconnu que d'un premier bond sans élan l'homme le plus agile peut à peine projeter son corps à un mètre de hauteur verticale. Nous disons que cette limite n'est point due à l'insuffisance de l'intensité de la contraction musculaire, mais bien à l'insuffisance de sa vitesse intrinsèque; et en effet, après un, deux ou trois bonds sur un sol élastique, l'impulsion transmise par ce sol est appliquée aux extrémités inférieures : les muscles extenseurs, pour ajouter quelque chose à cette vitesse en s'opposant d'abord à la flexion des membres que cette impulsion tend à produire, ont besoin de déployer une énergie de contraction directement proportionnelle à la somme de vitesse dont le corps pourra être animé, soit par la réaction élastique du sol, soit par l'extension de ses propres leviers; les muscles répondent facilement à ce degré d'énergie de contraction : donc, s'ils ne peuvent élever le corps par eux-mêmes qu'à une hauteur d'un mètre, cela tient uniquement à la limitation de la vitesse de la contraction musculaire.

Il est évident, pour tous les observateurs attentifs des mouvemens de l'homme, que nous sommes susceptibles de franchir ou d'atteindre, en sautant, des points plus élevés dans l'espace que la hauteur d'un mètre, que nous avons fixée pour limite à l'ascension verticale du centre de gravité du corps; mais il faut remarquer que ce centre de gravité est déjà situé, dans la station, à environ un mètre du sol, et qu'il en est séparé par ces leviers angulaires dont l'extension a produit le saut. En sorte que si, après avoir communiqué au tronc une vitesse ascensionnelle quelconque, on vient à fléchir les mêmes extrémités dont l'extension produit le saut, les pieds pourront s'éloigner du sol en se rapprochant du tronc, d'environ $0^m,4$, en sorte qu'un obstacle de $1^m,4$ pourra être franchi d'un saut, quoique l'élévation réelle du centre de gravité n'ait été que d'un mètre.

Cette circonstance explique un très grand nombre d'actions dans lesquelles le centre de gravité du corps est à peine élevé, quoique les pieds s'éloignent beaucoup du sol. C'est ce qui arrive dans la course à cloche pied, dans l'action de sauter sur une corde tournante, etc. On sent qu'il est nécessaire, pour exécuter ces mouvemens, que les membres inférieurs aient le temps de se fléchir et de s'étendre de nouveau pendant que le centre de gravité du corps reste en quelque sorte suspendu dans l'espace, ce qui est au reste d'autant plus facile que le léger mouvement ascensionnel du centre de gravité du corps est uniformément retardé, et que la vitesse de sa chute est très petite dans les premiers momens.

Telle nous paraît être la véritable théorie du saut chez l'homme, lorsqu'il l'exécute suivant la ligne verticale, et lorsque l'extension des membre est complète, ce qui arrive communément dans ce cas.

DU SAUT TANGENTIEL.

175. Il s'en faut de beaucoup que, dans toutes les circonstances, la projection du corps d'un animal se fasse suivant les règles que nous venons d'établir, et même chez l'homme on peut observer beaucoup de circonstances dans lesquelles la cause de projection est évidemment une vitesse tangentielle.

Si, par exemple, nous supposons tous les membres inférieurs fortement fléchis comme dans la *fig.* 4, *pl.* V, la direction du tronc suivant la ligne D E, et si nous admettons qu'il se produise tout à coup une extension limitée de chaque angle de flexion, nous verrons que le point B prendra une vitesse tangentielle exprimée par l'arc B *b*, qui diffère très peu de sa tangente; que le point C prendra de son côté une vitesse C *c*; et qu'enfin le point D sera transporté en petit *d* avec la somme des trois vitesses tangentielles. Les directions de ces vitesses ne sauraient être verticales dans le cas supposé, mais elles se rapprocheront assez de cette direction pour produire une résultante importante dans ce sens.

On voit que la situation indiquée *fig.* 4 est très favorable au saut, dans ce sens que les vitesses sont directement celles que les leviers prennent dans les arcs qu'ils décrivent, au lieu d'être représentées seulement par leurs sinus verses, comme dans le cas précédent; mais ce qui apporte des limites très restreintes à ce mode de saltation, c'est que les espaces parcourus par les extrémités des leviers ne sauraient atteindre une certaine amplitude sans que les vitesses tangentielles se rapprochent de la direction horizontale.

Pour que le genre de saut que nous venons d'indiquer

puisse s'opérer avec avantage, il est indispensable que le levier C D (*fig.* 5, *pl.* V) puisse arriver dans une situation telle, que son extrémité D soit placée beaucoup plus bas que son extrémité C, de manière que l'arc D *d* puisse présenter une grande amplitude avant que le levier atteigne la direction horizontale, position dans laquelle la vitesse tangentielle sera devenue verticale. On conçoit, en effet, que pendant tout le temps que le point D mettra à parcourir l'arc D *d*, il recevra l'impulsion d'une force accélératrice, en sorte que la vitesse au point *d* pourra être considérée comme à peu près proportionnelle au carré de l'amplitude de l'angle. On ne saurait considérer la *fig.* 5 sans juger immédiatement qu'elle représente le mode de saltation des singes, de la puce et surtout de la sauterelle, qui semble présenter le type de cette disposition favorable à la projection verticale de son corps. On peut juger cependant que la vitesse du point D n'est due qu'à l'influence des différences de longueur des bras d'un seul levier, et qu'en conséquence il faut expliquer l'extrême hauteur à laquelle cet animal s'élève, par la supériorité de la vitesse intrinsèque de sa contraction musculaire.

Un grand nombre de mouvemens de locomotion de l'homme ou des animaux se rapportent au saut tangentiel, quoique ces mouvemens portent un autre nom.

Le saut de l'homme en avant, précédé ou non d'une course horizontale, le galop du cheval, la progression du lièvre et du lapin, et de tous les animaux qui posent sur le sol toute l'étendue de leurs pieds de derrière, sont le résultat de vitesses tangentielles acquises, soit à l'extrémité postérieure du pied, soit à l'extrémité supérieure du fémur; mais la course de l'homme en présente un exemple trop particulier, et qui nous a paru trop imparfaitement analysé jusqu'ici, pour que nous n'en donnions pas une idée.

Dans la *fig.* 6, tous les leviers sont indiqués par les mêmes lettres que dans les *fig.* précédentes, mais tout le corps est incliné en avant à l'horizon, de sorte que le point D tend à tomber suivant la tangente D O, à l'arc décrit de l'extrémité des pieds comme centre; cependant une des jambes est en arrière et repose sur le point A, l'angle B tend à s'ouvrir, et il en résulte une force tangentielle suivant B E; pendant ce temps l'autre jambe a pris la situation A' B' C' D, et il se produit une vitesse tangentielle au point B' et une autre vitesse tangentielle au point D, toujours dans la direction B D: il en résulte une impulsion du centre de gravité suivant D N, qui, se composant avec la force D O, doit mouvoir et meut en effet le centre de gravité du corps suivant la diagonale D M: observons seulement que cette ligne parcourue ne saurait être droite, mais qu'elle est ondulée comme la *fig.* l'indique, à cause des intervalles qui existent entre les impulsions données successivement par les deux membres inférieurs.

Il est important que ces impulsions soient très rapprochées les unes des autres, car la ligne D N n'est point une ligne droite, et n'est véritablement qu'une branche de parabole, et dans un trop long intervalle d'une impulsion à l'autre. La direction tangentielle à cette courbe se rapprocherait de l'horizontalité, et le centre de gravité serait porté vers le sol, ce qui arrive en effet toutes les fois qu'un obstacle quelconque s'oppose à ce que l'impulsion d'une jambe succède assez promptement à celle de l'autre.

DE L'APPLICATION DE LA FORCE DE L'HOMME A DES EFFORTS EXTÉRIEURS.

176. Nous avons déjà parlé de la circonstance remar-

quable dans laquelle un homme projette et lance au loin un corps plus ou moins pesant, et nous avons vu que la vitesse de projection était plutôt relative à la vitesse même de la contraction musculaire qu'à l'intensité de cette puissance. Il doit être question ici de l'exercice de la force de l'homme pour surmonter des résistances extérieures dans les limites de vitesse les plus favorables, et, sous ce point de vue, le problème présente une grande variété de circonstances; nous nous contenterons en conséquence d'examiner un certain nombre de cas parmi les plus intéressans.

La force de l'homme peut être employée à supporter des fardeaux, de manière à prévenir leur chute ou à combattre avec avantage l'action de leur pesanteur.

On conçoit que le fardeau doit être disposé de telle sorte que la ligne du centre de gravité commun de cette masse additionnelle et du corps de l'homme puisse tomber dans la base de sustentation, et sous ce point de vue le fardeau ne saurait être mieux placé que sur les épaules et la tête, comme on voit les forts de la halle porter un sac de grains. Dans cette situation, tous les leviers qui concourent à la station devront être aussi rapprochés que possible de la direction verticale, car les os supporteront alors le poids par leur solidité propre; et il semblerait en effet que le corps de l'homme pût supporter ainsi d'énormes fardeaux. Il survient pourtant une limite assez restreinte à cette faculté, mais c'est en quelque sorte par une circonstance accessoire. Les os se répondent par des surfaces arrondies, lisses et polies: le plus léger changement dans leur direction verticale, qui ne produit qu'un équilibre instable, suffirait pour entraîner la chute de l'homme et de son fardeau; il s'agit donc de maintenir l'équilibre de la station malgré l'influence du poids additionnel, et pour cela il est nécessaire que presque tous les muscles du corps soient à

la fois dans un état de contraction, qu'il est très difficile de maintenir pendant un certain temps, et qui produit un sentiment de fatigue d'autant plus prompt que la contraction musculaire est plus générale.

La difficulté devient encore plus grande si l'homme ainsi chargé d'un lourd fardeau doit se livrer à la progression; il faudra que pendant un moment la masse soit portée par un seul des membres inférieurs, et l'équilibre maintenu sur ce seul membre; le pas sera court et rapide, surtout dans l'action de rapprocher le pied laissé en arrière : les pieds seront un peu écartés pour élargir la base de sustentation. Enfin, un bâton sur lequel on s'appuiera d'une main sera d'un grand secours, bien moins pour supporter une partie du fardeau que pour faciliter la conservation de l'équilibre.

Un homme peut communément porter et transporter ainsi lentement un poids de 125 kilogrammes. Les hommes robustes, exercés à ces genres de travaux, peuvent en porter jusqu'à 250.

La position dans laquelle le tronc est fléchi, et les mains appuyées sur les deux genoux, permet de supporter, du moins sans déplacement, des fardeaux encore plus considérables.

Lorsqu'il s'agit de charger le corps de l'homme d'un fardeau peu considérable, il est vrai, mais qu'il doit supporter pendant une longue marche, la disposition la plus convenable est sans contredit de placer le fardeau à la partie postérieure et supérieure du tronc, en le fixant aux épaules par des courroies d'une forme aplatie, comme cela se pratique pour les fantassins qui portent le sac; quant au fusil, il est appuyé successivement sur l'une et l'autre épaule : le maximum d'un pareil fardeau ne dé-

passe guère 60 livres, et son transport exige une inclinaison continuelle du tronc en avant.

La force d'un homme peut être appliquée à déplacer horizontalement sur le sol un fardeau qui peut y glisser, ou qui est supporté par des roues. Ce genre d'action est impossible à l'homme dans son état de station verticale. Pour le produire, il attache ses épaules au fardeau qu'il s'agit de traîner, puis il incline le corps en avant, de manière à déplacer son centre de gravité, et l'effort qu'il peut ainsi produire est mesuré par la tendance de ce centre de gravité pour tomber en avant, laquelle tendance est en raison inverse du sinus de l'angle d'inclinaison du corps par rapport au sol. Cet angle a des limites obligées, parce que la marche devient d'autant plus difficile que les pieds sont plus fléchis sur la jambe par l'inclinaison du corps en avant. Cet angle, au reste, ne pouvant guère dépasser 45 degrés, la force de l'homme dans cette situation ne saurait excéder la moitié du poids de son corps ou 37 kilogrammes; mais comme les puissances des extenseurs des membres inférieurs sont capables de bien plus grands efforts, il serait avantageux que l'homme exerçant ce genre d'action eût en même temps les épaules chargées d'un poids assez considérable. On voit du reste que l'action des extenseurs agit suivant la direction du corps, qui forme un angle avec la ligne que doit parcourir la résistance, et qu'ainsi la puissance de l'homme est désavantageusement appliquée.

La force de l'homme est souvent employée à mettre en mouvement l'extrémité d'une manivelle qui représente assez bien le rayon d'un cercle dont la main suit la circonférence. Il est évident que, pour mettre une semblable machine en mouvement avec quelque avantage, il faut que la puissance soit toujours appliquée perpendiculairement au

rayon; et comme ce rayon se déplace sans cesse, la direction de la force appliquée doit varier à chaque instant, et se trouver à tout moment dans toutes les tangentes du cercle décrit. Il faut que le membre supérieur de l'homme et sa main soient doués d'une organisation aussi mobile qu'elle l'est en effet, pour se prêter à la production d'un semblable mouvement.

Quoi qu'il en soit, dans les différens temps de la rotation de la manivelle, les forces de l'homme lui sont appliquées dans des conditions bien différentes, que l'on peut rapporter à quatre situations principales.

1° Si l'on suppose la manivelle en haut, l'homme devra la pousser devant lui; pour cela, il portera un pied en arrière et inclinera son corps de manière à produire dans son centre de gravité une tendance pour tomber antérieurement; cette tendance sera la seule puissance qui agira sur la manivelle, elle sera toujours très bornée.

2° Si la manivelle ayant fait un quart de tour est devenue horizontale et tournée en avant, l'homme pourra faire peser directement sur elle une grande partie ou même la totalité du poids de son corps, et cette puissance sera très considérable.

3° Si la manivelle est arrivée au bas de sa course, l'homme ne pourra la mouvoir qu'en avançant un de ses pieds, et donnant à son centre de gravité une tendance pour tomber en arrière; cette puissance sera toujours très petite.

4° Enfin si la manivelle est redevenue horizontale, mais tournée du côté de l'homme, celui-ci pourra la relever en faisant usage de l'action simultanée de tous les extenseurs de la colonne vertébrale. Ce sera le maximum de la puissance; elle pourra même surpasser les effets du poids du corps.

On voit que l'effort de l'homme en tournant une manivelle a deux *maxima* et deux *minima*, et que dans le cas où deux hommes seraient appliqués à un même mouvement de rotation, il conviendrait que les manivelles fussent croisées à angles droits.

On sent qu'il est nécessaire que l'axe de la manivelle soit placé à peu près à la moitié de la hauteur du corps de l'homme, afin qu'il ne soit pas forcé d'élever ou d'abaisser beaucoup ses mains, auquel cas la force deviendrait presque nulle dans les *minima*.

La longueur de la manivelle est aussi un point fort important : trop considérable, elle exigerait le déplacement des pieds sur le sol, tandis que, dans des dimensions convenables, un pied situé en avant et l'autre en arrière suffisent pour répondre au mode d'action des deux *minima*. Trop petite, elle ne donnerait pas à la puissance de la main un avantage suffisant sur la résistance à vaincre; elle exigerait aussi des changemens trop brusques dans la direction de la puissance. On a remarqué qu'un rayon d'un pied à 15 pouces est la longueur qui convient le mieux : ainsi une circonférence de six pieds est parcourue par la main avec une vitesse qui d'ailleurs ne peut guère dépasser trois pieds ou un mètre par seconde.

On estime que la force de l'homme ainsi employée avec continuité pendant la journée, représente une puissance de vingt-cinq livres, animée d'une vitesse d'un mètre par seconde.

Le mode d'application des forces de l'homme, que nous venons de décrire, est un des plus avantageux, et celui qui se supporte le plus long-temps avec le moins de fatigue et le moins d'inconvénient pour la santé; on en a même fait un moyen hygiénique qui n'est pas sans utilité. Ces avantages proviennent de ce que dans cet exercice tous les

muscles du corps, presque sans exception, sont successivement employés à vaincre l'obstacle avec des alternatives de repos et de mouvement, dont les intervalles sont suffisans pour rendre à chaque muscle qui s'est contracté toute son aptitude à une contraction nouvelle.

La force de l'homme peut être employée en faisant exclusivement usage des extenseurs des membres inférieurs; et ce dernier mode est d'autant plus important, que ces extenseurs sont par eux-mêmes puissans et nombreux; qu'ils sont constamment exercés dans l'habitude de la vie par la station et la progression; et qu'enfin, lorsqu'on emploie comme puissance dynamique les muscles de la partie supérieure du corps, il n'en est pas moins nécessaire que les muscles des membres inférieurs se contractent fortement, soit pour fournir des points d'appui, soit pour maintenir la station. Il existe plusieurs modes d'application de l'extension de ces membres inférieurs.

1° Des hommes peuvent avoir le dos et les reins solidement appuyés dans une espèce de niche verticale, et les mains fixées à une traverse horizontale, pendant que leurs pieds sont employés à pousser de haut en bas les échelons d'une très grande roue placée devant eux. On conçoit que cette situation est très avantageuse, et que l'homme peut y déployer, du moins momentanément, une force de plus de cent livres, sans éprouver une fatigue très considérable. C'est ce que l'on peut observer dans les grues, qui sont employées sur les ports de Paris au déchargement des bateaux.

2° On peut placer les deux pieds d'un homme sur deux espèces de pédales qu'il presse alternativement par un pied ou par l'autre, en transportant le poids de son corps sur l'un ou l'autre membre. Ce moyen est employé pour presser les doubles soufflets qui servent dans quelques

usines à la fusion du fer. Il serait très applicable à la progression de l'homme sur une machine de rotation mue par ses propres forces, et nous en avons fait l'expérience avec succès.

DESCRIPTION D'UN BILLARD PORTATIF.

177. En terminant la physique des corps solides, je crois devoir décrire un appareil commode et peu dispendieux que j'ai fait construire pour le cabinet de la Faculté de Médecine, et qui me sert à répéter en public plusieurs expériences de mécanique. Il est destiné à remplacer le billard de marbre dont peu de cabinets de physique sont pourvus, et qui d'ailleurs ne saurait être transporté dans un amphithéâtre. Cet appareil et ses accessoires sont dessinés dans la *pl.* 6.

La *fig.* 1re représente une table de bois de chêne, de 2 pieds de large sur 8 pieds de long. Le fond de cette table est fort épais; il a été dressé et poli avec beaucoup de soin; il est entouré de quatre bandes à la manière d'un billard; chacun de ses pieds est muni d'une vis, dont la tête est percée; on s'en sert pour mettre la table de niveau, au moyen d'un appareil à bulle d'air.

Vers un bout de la table se trouve fixée une traverse AB, qui supporte des marteaux. Ces marteaux en ivoire, dessinés en grand dans la *fig.* 2, sont montés sur des pivots, et se meuvent suivant des arcs de cercle en cuivre gradués, le long desquels se fixe un curseur, qui limite le point jusqu'où le marteau peut être élevé pour le laisser retomber sur la bille. Les marteaux et les arcs de cercle sont mobiles par un glissoire d'avant en arrière, et peuvent d'ailleurs tourner sur un axe vertical, en sorte que deux de ces marteaux, montés sur la traverse A B, peuvent

prendre à volonté toutes les situations et toutes les directions qu'il peut être nécessaire de leur donner, pendant que d'une autre part on mesure leur vitesse au moyen du nombre de degrés de l'arc d'où on les laisse tomber. Le corps C, *fig.* 1re, est un parallélipipède de marbre qui sert à la réflexion des billes ; le corps D est une pièce qui représente exactement la bande d'un billard ordinaire ; elle est chargée de plomb pour résister au choc sans se déplacer; *b*, *b*, sont des billes d'ivoire.

L'appareil est disposé dans la *fig.* 1re pour répéter l'expérience du parallélogramme des forces ; ce parallélogramme est dessiné sur le fond de la table. L'un des marteaux est dirigé suivant un des côtés du parallélogramme, et la hauteur de son ascension est fixée par expérience, de manière que la bille frappée par ce marteau parcourt ce côté du parallélogramme exactement en une seconde, ce dont on s'assure, en répétant l'expérience avec un pendule. Le second marteau est disposé de même par rapport au second côté du parallélogramme, et les deux marteaux sont disposés réciproquement de manière à pouvoir frapper en même temps la bille. Si en effet on les soulève tous deux et qu'on les abandonne dans le même instant, on verra que la bille suivra la diagonale du parallélogramme, et ira frapper le plan de marbre C exactement en une seconde. La *fig.* 3 représente un chariot à colonnes, destiné à laisser tomber une bille d'ivoire du godet supérieur A dans le godet inférieur B : cette chute a lieu suivant la verticale dans le repos du chariot; mais si le chariot est en mouvement, et que la bille s'échappe, elle tombe encore exactement dans le godet inférieur; ce qui sert à prouver que les mouvemens communs d'un système de corps ne changent absolument rien aux mouvemens propres de chacun des corps qui composent ce système.

La *fig.* 4 représente deux petits chariots dont les poids sont égaux : l'un d'eux porte un barillet contenant un ressort, et disposé de manière qu'en tirant un fil de soie qui l'enveloppe, le ressort se tend et produit une puissance qui peut avoir pour effet de mettre le chariot en mouvement. Si l'on attache l'extrémité du fil de soie au second chariot, qu'on les écarte l'un de l'autre, qu'on les transporte aux deux extrémités du billard, si on les abandonne en même temps ils se mettent en mouvement, se rapprochent et se rencontrent précisément au milieu de l'espace qui les séparait.

Si l'on charge l'un des deux chariots d'un autre poids égal au sien, c'est-à-dire si l'on double sa masse, en répétant de nouveau l'expérience, on trouve que les chariots se rencontrent précisément au tiers de l'intervalle qui les séparait, le plus léger ayant parcouru les deux tiers de l'espace, pendant que le plus pesant en a parcouru seulement un tiers. Cette expérience sert à donner une idée de ce qu'on nomme *quantité de mouvement*, et prouve que pour des forces égales les vitesses sont réciproquement proportionnelles aux masses.

—

LIVRE TROISIÈME.

DES CORPS LIQUIDES.

CHAPITRE PREMIER.

DES PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DE LA MATIÈRE CONSIDÉRÉE DANS LES CORPS LIQUIDES.

178. *De la figure dans les corps liquides.* — Nous avons vu que les corps liquides avaient par eux-mêmes, et quand on pouvait les soustraire à toute autre influence étrangère, une forme sphérique, qui résulte nécessairement de l'égalité, dans tous les sens, de la force d'attraction agissant suivant les lois connues de la mécanique. Mais ce cas se rencontrant très rarement, les liquides affectent communément la forme des corps solides ou des vases qui les contiennent, si toutefois on en excepte leur face supérieure, quand elle est libre. La forme de cette face supérieure présente une circonstance très générale et très remarquable, elle paraît toujours plane et horizontale. Il est important d'établir ici la raison de cette apparence.

Si nous considérons le globe terrestre dans sa totalité, nous concevrons que, s'il était entièrement formé de liquide, la surface de ce liquide serait à peu près sphérique; mais à cause de la grande longueur du rayon de la sphère,

une portion limitée de cette surface nous paraîtrait plane et perpendiculaire à la normale de cette surface, qui n'est que le prolongement du rayon de la sphère, et, par conséquent, toutes les étendues limitées de cette surface seraient ce que nous appelons horizontales.

La masse de la terre est formée de parties solides et liquides, mais de telle façon que les 75 centièmes de sa surface sont liquides. Cette grande étendue qui porte le nom de *mers*, prend, autant que le lui permettent les parties solides, la forme sphérique; en sorte que la surface d'une mer tranquille est partout horizontale et semble plane dans une petite étendue. Il est pourtant facile de s'assurer que la surface de la mer est effectivement convexe; car si, du niveau de la mer, on observe avec une lunette un vaisseau encore très éloigné, on apercevra le sommet de ses mâts, lorsque la masse du vaisseau sera encore cachée par la convexité de la mer.

Les mêmes dispositions qui existent dans les grandes masses d'eau que présente le globe, se retrouvent dans les surfaces supérieures libres du plus petit volume de liquide renfermé dans les vases, et ces surfaces paraissent alors tout à fait planes, parce que leur étendue est beaucoup trop petite pour que la courbure soit appréciable.

Les dernières particules des liquides ont probablement des formes polyédriques régulières; cela est du moins démontré pour une foule de liquides qui, comme l'eau par exemple, ont la propriété de passer à l'état solide sans changement de composition, et cristallisent alors régulièrement. Il faut donc, pour expliquer la mobilité et l'indifférence à toute sorte de situations réciproques des particules de liquides, supposer que les particules du calorique les entourent et les enveloppent en quelque sorte, de manière à les transformer en molécules complexes réellement

sphériques et pouvant rouler librement les unes sur les autres.

DE LA POROSITÉ DANS LES LIQUIDES.

179. La porosité ne saurait être rendue sensible dans des corps liquides par les moyens dont nous nous sommes servis pour la démontrer dans les solides. On ne peut jamais apercevoir d'intervalle appréciable entre leurs molécules, et leurs surfaces sont toujours parfaitement polies quand elles sont libres, ou exactement moulées sur celles des corps solides qui les renferment. On voit bien un liquide en pénétrer un autre, ou, comme on le dit communément, se *mêler* avec lui, ce qui suppose que les molécules de l'un se placent entre celles de l'autre; mais comme alors le volume augmente, on peut croire que les écartemens se produisent pour recevoir les particules nouvelles et qu'ils n'existaient pas auparavant. Il y a cependant un grand nombre d'expériences qui prouvent que les liquides peuvent diminuer de volume, et que, par conséquent, leurs molécules ne se touchent pas; nous en citerons une des plus remarquables.

Si l'on prend un tube de verre de quelques millimètres de diamètre et d'un mètre de longueur, fermé par une de ses extrémités, si l'on remplit ce tube aux deux tiers avec de l'acide sulfurique concentré, et qu'on achève de le remplir avec de l'eau pure, et si l'on bouche exactement le tube ainsi rempli, les deux liquides resteront séparés par la différence de leurs poids spécifiques. Mais si dans cet état on vient à renverser le tube, les deux liquides se mêleront; il se dégagera une très grande quantité de chaleur: et après que le tout sera refroidi, on trouvera le volume des liquides diminué d'une manière sensible, et le tube

n'en sera plus rempli comme précédemment. Il faut donc admettre que les particules de ces liquides aient été éloignées les unes des autres avant l'opération, qu'elles se soient rapprochées, et par conséquent qu'il existe des *pores* dans les liquides.

Il faut bien entendre qu'il n'existe dans les liquides rien d'analogue à ce que nous avons nommé corps essentiellement poreux parmi les solides, c'est-à-dire qu'*on* ne rencontre point d'espace vide commensurable, et qui puisse augmenter, diminuer ou changer de forme d'une manière apparente. Il est même démontré que lorsqu'un liquide contient des gaz en dissolution, ces nouveaux corps n'y conservent pas leur forme, mais partagent celle du liquide. Une mousse épaisse produite par l'agitation violente d'un liquide visqueux est le seul cas qui présente quelque analogie avec les corps solides essentiellement poreux; et alors la mobilité des particules liquides est détruite par leurs dispositions en parois minces autour des petites bulles de gaz qu'elles enferment. Nous verrons, en parlant de la compressibilité, que cette propriété fournit une nouvelle preuve de la porosité des liquides.

DE LA MOBILITÉ DANS LES LIQUIDES.

180. La propriété générale de la matière, en vertu de laquelle elle peut changer de place dans l'espace, est extrêmement remarquable dans les corps liquides; elle y présente cette particularité, que chaque portion du corps doit être en quelque sorte mue et transportée à part, puisqu'il n'y a aucun lien qui attache les portions les unes aux autres, comme nous avons vu que cela arrivait dans les corps solides.

Il résulte aussi de cette indépendance des différentes

parties d'un liquide, sous le rapport de leur mobilité, que les problèmes du mouvement des corps liquides sont très difficiles et souvent impossibles à résoudre avec exactitude. Les impulsions se transmettent dans tous les sens avec des intensités variables, et chaque molécule se meut non seulement en vertu de l'impulsion première, mais encore suivant sa position primitive et ses rapports avec les autres molécules. Nous avons vu que les corps solides étaient susceptibles d'un certain nombre limité de mouvemens; mais les corps liquides sont susceptibles de toute espèce de mouvement, soit en totalité, soit entre leurs particules. On peut même dire, comme caractère des corps liquides, qu'ils sont essentiellement mobiles. Cependant tous les corps liquides ne sont pas également mobiles; et si l'on agite dans différens vases de l'huile, de l'acide sulfurique, de l'eau et de l'éther, il sera très facile de distinguer ces différens corps à leurs différens degrés de mobilité dans le vase. La disposition qui semble ainsi s'opposer à ce que les parties d'un liquide se meuvent librement les unes sur les autres, porte le nom de viscosité.

DE LA DIVISIBILITÉ DANS LES LIQUIDES.

181. Cette propriété générale de la matière n'a, dans les liquides, ni limites, ni mesure. On sait seulement qu'une très petite quantité d'un liquide coloré peut se répandre et se distribuer dans une masse énorme d'un autre liquide et lui communiquer ses propriétés. On sait encore qu'une seule goutte d'acide sulfurique concentré peut donner des propriétés acides distinctes à 20,000 fois son poids d'eau. Mais ces faits sont loin de présenter des données aussi positives que celles qui ont été rapportées en parlant des corps solides.

On peut assurer que les molécules des liquides sont extraordinairement petites, puisque nous savons que ces liquides existent en circulation dans des animaux déjà microscopiques eux-mêmes, et dont les plus petits vaisseaux doivent être par conséquent d'une grande ténuité.

DE L'IMPÉNÉTRABILITÉ DANS LES LIQUIDES.

182. Quoiqu'il soit toujours extrêmement facile d'introduire un corps quelconque au milieu d'une masse liquide, il est également facile de s'assurer que ce phénomène n'est pas une pénétration, mais un véritable déplacement. En effet, si c'est un corps solide que l'on introduise dans un vase déjà complètement rempli d'eau par exemple, il s'échappera de ce vase une quantité d'eau précisément égale au volume du corps introduit, pourvu que ce corps n'en ait point admis dans son intérieur ou dans ses pores, circonstance que nous avons expliquée précédemment.

L'impénétrabilité réciproque des liquides les uns pour les autres est également prouvée par le volume du mélange, qui est toujours égal à la somme du volume des liquides mêlés, excepté lorsqu'il y a entre eux une réaction chimique, auquel cas il y a une véritable condensation qui tient à la porosité des liquides, et non à leur pénétration véritable.

Les liquides ne sont pas plus pénétrables pour les gaz que pour les solides ou les liquides eux-mêmes, car on chasse l'air d'un flacon en le remplissant d'eau; et si ce flacon, plein d'eau, est renversé sur une cuve hydropneumatique, on pourra y faire passer, bulle par bulle, un gaz qui déplacera peu à peu l'eau contenue, et finira par remplir entièrement le flacon. Il faut en excepter les cas où le gaz est soluble dans le liquide; car alors il y a une

action chimique, il se dégage du calorique, le gaz devient liquide, et le liquide augmente de volume.

Si les liquides paraissent plus pénétrables que les autres corps, quand leurs molécules sont libres, il n'en est pas qui présentent une impénétrabilité apparente plus prononcée, quand leurs molécules sont exactement contenues et enfermées. Pour éprouver les pièces de canon, on les pose verticalement, l'ouverture en haut, on les remplit d'eau; on ferme l'ouverture avec un piston, et l'on frappe ce piston avec un mouton : si la pièce est bonne, le piston ne descend pas sous les plus violentes percussions; si elle a quelque fissure, l'eau s'en échappe avec violence ; si elle n'est point assez résistante, elle éclate; autant de preuves de l'impossibilité que le piston vienne occuper, dans la pièce, l'espace rempli par l'eau, et par conséquent de l'impénétrabilité du liquide.

CHAPITRE II.

DE L'ATTRACTION DANS LES CORPS LIQUIDES.

183. L'attraction, considérée en général et dans un grand éloignement des corps qui s'attirent, s'exerce entre les corps liquides comme entre les autres espèces de corps, et sans que leur état particulier influe en rien sur les phénomènes: et, comme nous l'avons dit (99), quand les planètes seraient liquides, les phénomènes célestes resteraient absolument les mêmes.

Lorsque l'attraction se passe entre des petites masses voisines les unes des autres, ou entre les molécules d'une même masse, l'état de fluidité influe considérablement sur

les phénomènes, et par conséquent il devient nécessaire d'étudier successivement, dans les corps liquides, le *poids*, le *poids spécifique*, l'*adhésion* et la *cohésion*, avec toutes leurs circonstances.

DU POIDS DES LIQUIDES.

184. Les liquides éprouvant, comme les corps solides, les effets de l'attraction terrestre, avec une parfaite égalité pour chacune de leurs particules, il en résulte qu'une masse quelconque de liquide présente un *poids*, c'est-à-dire une somme totale de toutes les forces de la pesanteur qui la sollicitent. Mais comme toutes les particules des liquides sont mobiles les unes sur les autres, il est impossible de peser un liquide seul, car chacune de ses molécules tendrait à s'approcher, pour son compte, du centre de la terre, par le plus court chemin et indépendamment de toutes les autres. Il devient donc nécessaire de contenir ou d'enfermer le liquide dans un vase solide, dont on connaît déjà le poids particulier, afin que toutes les forces de pesanteur du liquide, s'appliquant à ce corps solide, puissent fournir une résultante dont on appréciera la valeur en la comparant à des unités de poids connues.

Malgré cette difficulté accidentelle que présente l'action de peser un liquide, c'est pourtant dans le poids d'un certain volume d'eau qu'on a cherché l'élément de tous les autres poids, comme nous l'avons dit précédemment.

En parlant du poids des liquides, il est bien essentiel de le distinguer de ce qu'on nomme leur *pression*. En effet, nous verrons, en traitant de l'application des lois de la mécanique aux corps liquides, que ces sortes de corps, à raison de la mobilité de leurs molécules, sont susceptibles d'exercer à la fois les mêmes pressions dans plusieurs sens, en

sorte que la somme des pressions peut excéder considérablement le poids réel d'un liquide donné.

DU POIDS SPÉCIFIQUE DES LIQUIDES.

185. Tout ce que nous avons dit (70) du poids spécifique en général, s'applique aux corps liquides en particulier; mais on conçoit que les méthodes indiquées (101) pour déterminer le poids spécifique des solides deviennent superflues pour les liquides, et ne leur seraient point applicables. Il existe un moyen beaucoup plus simple et très général pour déterminer avec exactitude le poids spécifique d'un liquide quelconque. En effet, si l'on prend un vase d'un poids connu, que l'on remplisse ce vase d'eau, et qu'on le pèse, on connaîtra le poids du volume d'eau que ce vase peut contenir; et si on le remplit ensuite de tout autre liquide, il présentera un nouveau poids, plus grand ou plus petit, qui donnera le poids spécifique, l'eau étant supposée 1,000, en faisant la proportion $p : p' :: 1,000 : x$, p étant le poids trouvé pour l'eau contenue dans le vase, p' le poids du liquide, et x le poids spécifique cherché.

Cette opération, extrêmement simple, exige pourtant un assez grand nombre de précautions minutieuses quand on veut obtenir des résultats exacts. D'abord, il faut être sûr que le vase soit toujours rempli de la même manière; et pour cela, son col doit être fort étroit, comparativement à sa capacité, et le niveau marqué par un trait. En second lieu, la capacité du vase étant susceptible de varier avec la température, les expériences doivent être faites au même degré de chaleur, ou du moins, le volume corrigé par les lois connues de la dilatation de la substance du vase, qui est ordinairement de verre. Enfin, les liquides eux-mêmes changent de volume avec la température, et les mêmes

observations leur sont applicables. Il est presque superflu d'ajouter que les expériences doivent être faites avec des balances très sensibles. La méthode que nous venons de décrire, et qui est susceptible d'une exactitude parfaite, est souvent remplacé dans l'usage habituel par l'emploi d'un instrument que l'on nomme *aréomètre* ou *pèse-liqueur*, et dont nous donnerons la description et la théorie, en parlant des pressions exercées par les liquides sur les corps plongés dans leur intérieur.

Nous donnons ici une table des poids spécifiques des principaux liquides comparés à celui de l'eau pris pour unité.

Eau pure.	1,000
Eau de mer.	1,026
Mercure.	13,586
Acide sulfurique concentré.	1,850
—— nitrique	1,554
Huile d'olive.	0,915
—— de lin.	0,949
—— de térébenthine.	0,870
Esprit de vin du commerce. . . .	0,837
—— rectifié.	0,829
Éther sulfurique.	0,715

DE L'ADHÉSION DES LIQUIDES.

186. Nous avons vu que les corps solides, quand ils sont en rapport par des surfaces étendues et bien polies, peuvent adhérer les uns aux autres. Nous avons observé aussi que cette adhérence était assez difficile à produire par la nécessité de donner lieu à un contact exact : la même difficulté n'existe pas pour les liquides dont les particules mobiles se pressent et s'appliquent exactement sur tous les

autres corps. C'est pourquoi il y a presque toujours adhérence lorsqu'on met un corps solide en contact avec un liquide. Nous avons vu (25) que lorsqu'un plan solide touchait à la surface d'un liquide, il fallait une force pour les séparer, mais que le plan entraînait une couche du liquide, ce qui prouve que l'adhésion du liquide au solide est plus forte que la cohésion du liquide.

La force d'adhésion des liquides pour les solides est extrêmement variable suivant la nature des corps. Lorsqu'elle est considérable, on a coutume de dire que le liquide *mouille* le solide, parce qu'il le recouvre d'une couche adhérente. C'est ainsi que l'eau mouille le bois, le marbre ou le verre. Cette adhérence peut être telle, que les corps solides enlèvent l'humidité à l'air atmosphérique et la condensent en liquide à leur surface. C'est ce qui constitue les corps hygroscopiques ou hygrométriques. Il arrive souvent, au contraire, que les corps liquides n'ont aucune tendance à s'appliquer sur les corps solides ou ne sont pas susceptibles de les mouiller. C'est ainsi que l'eau glisse sur les corps gras sans contracter d'adhérence avec eux. Dans ce cas, on voit les liquides, au lieu de s'étendre en couche à la surface des corps solides, se rassembler en gouttelettes qui s'approchent de la forme sphérique, parce que la force de cohésion du liquide l'emporte de beaucoup sur son adhérence au solide. C'est ainsi que le mercure se divise en petites gouttes sphériques sur une lame de verre, tandis qu'il s'étale et s'applique sur une lame d'or.

Le corps de l'homme présente des effets de ce genre. La peau est ordinairement recouverte d'un enduit sébacé qui ne permet pas l'adhérence du liquide, et quand on sort de l'eau après une immersion de peu de durée, la surface de la peau est couverte de gouttes liquides, séparées les unes des autres. Mais si l'immersion a été longue et accom-

pagnées de frictions répétées, ou de l'action d'un corps alcalin, la peau est alors véritablement mouillée, et peut même se trouver macérée à tel point, qu'il faut admettre une sorte d'imbibition qui en distend et relâche le tissu.

On a cherché à mesurer, dans quelques circonstances, la force d'adhérence des corps solides et des liquides, et on a trouvé les résultats suivans :

Un disque d'or adhère au mercure avec une force de	23,63
— d'argent	22,74
— d'étain	22,15
— de plomb	21,04
— de bismuth	19,71
— de platine	14,98
— de zinc	10,81
— de cuivre	7,52
— de fer	6,10

Nous devons faire remarquer que ces résultats n'ont quelque valeur que pour les métaux qui, comme le fer, le cuivre, le zinc ou le platine, n'enlèvent point avec eux une couche de mercure. Quant à ceux qui, comme l'or, enlèvent la couche superficielle avec laquelle on les avait mis en contact, la force d'adhésion n'exprime autre chose que la cohésion même du mercure. Et il est infiniment probable que la vraie puissance d'adhésion du mercure à l'or est 3 ou 400 fois plus grande, puisque le mercure et l'or, en contact, forment un corps solide dont la cohésion est très considérable.

Il se passe, entre les liquides et les solides ou entre les liquides mis en contact dans certaines circonstances particulières, un grand nombre de phénomènes curieux qui,

usqu'à présent, n'ont point reçu d'explication satisfaisante. Nous nous contenterons d'indiquer les principaux.

Si l'on dépose une goutte d'huile à la surface d'une eau tranquille et pure, l'huile s'étendra rapidement en une couche mince à la surface de l'eau. Si des corps légers flottent à cette surface, ils seront rapidement poussés vers la circonférence du vase. Cette couche d'huile ne sera ni d'une épaisseur égale dans tous ses points, ni dans un état de repos; car si on l'examine au soleil, dans une situation convenable, elle présentera toutes les nuances des anneaux colorés, qui indiquent les diversités d'épaisseur, et ces nuances paraîtront dans un mouvement de gyration très rapide et très varié. Si l'on dépose à la fois plusieurs gouttes d'huile, elles s'étendront très peu et paraîtront se repousser.

Si l'on dépose une goutte d'alcool sur un vase mouillé d'eau, cette eau fuira rapidement de toutes parts, et le fond du vase restera sec. Il en arrivera autant si le vase est mouillé d'alcool, et qu'on y dépose une goutte d'eau.

Si l'on dépose un petit morceau de camphre à la surface de l'eau, on le verra bientôt prendre un mouvement de rotation très rapide; et si l'on fait varier sa forme, on reconnaîtra qu'il est animé d'une sorte de répulsion qui agit particulièrement à l'extrémité de ses parties les plus saillantes. Le phénomène cessera à l'instant, si l'on dépose à la surface de l'eau un peu d'huile ou d'alcool. Des mouvemens du même genre se produisent, dans une foule de circonstances, à la surface de l'eau, du mercure et de beaucoup d'autres liquides. Il est très difficile de se rendre compte de ces phénomènes curieux; mais il est probable qu'ils tiennent à une sorte d'effluve qui s'échappe du corps, et qui vient frapper sur le liquide en produisant une ré-

pulsion dans le corps même d'où elle émane, ainsi que l'a pensé M. Prévot de Genève.

DE LA COHÉSION.

187. Nous avons vu (78 et 103) que la cohésion, considérée en général ou dans les corps solides, était attribuée à un état d'équilibre stable entre la force d'attraction réciproque des molécules et la force répulsive du calorique. On pense que la cohésion des liquides est due au concours des mêmes causes, en admettant que les centres d'action des molécules peuvent rester à la même distance les uns des autres, quoique les molécules se déplacent réciproquement, en sorte qu'on pourrait considérer la molécule en mouvement comme décrivant un petit cercle autour de la molécule immobile. Cette explication satisfait à presque tous les phénomènes; mais il reste, comme pour les solides, à concevoir ce qui détermine la stabilité d'un semblable équilibre entre des molécules qui ne se touchent pas, et surtout comment il se fait que, dans les corps liquides, l'élasticité est beaucoup moins prononcée que dans les corps solides, et la compressibilité presque nulle.

La cohésion est très variable dans les différens liquides; elle diminue rapidement lorsqu'on les dilate au moyen du calorique, et il arrive, pour chacun d'eux, un certain terme, où la cohésion se trouvant détruite, le liquide est converti en fluide élastique.

On peut mesurer (25) la cohésion des liquides en déterminant la force nécessaire pour soulever un plan adhérent à leur surface, et capable d'enlever avec lui la couche en contact, c'est-à-dire susceptible d'être *mouillé* par le liquide.

188. Quoique l'on considère généralement la mobilité

des particules liquides les unes sur les autres comme absolue, il est cependant vrai que tous les liquides présentent, à divers degrés, une sorte de résistance au déplacement réciproque de leurs parties, qui, quand elle est considérable, prend le nom de *viscosité*. Ainsi, l'éther et l'alcool sont extrêmement mobiles; l'eau ne présente pas encore de résistance au mouvement, qui puisse influer beaucoup sur les effets mécaniques. Mais les corps gras offrent cette résistance dans un degré très prononcé, qui influe considérablement sur l'écoulement des liquides par des ouvertures.

Il est jusqu'à présent impossible d'expliquer, par les causes générales, le plus ou moins de viscosité des liquides, qui n'a, du reste, aucun rapport avec la densité, puisque l'huile est beaucoup moins dense que le mercure.

Nous devons étudier les différentes propriétés particulières qui tiennent à la cohésion des liquides, comme leur élasticité, leur compressibilité et leur dilatabilité.

ÉLASTICITÉ.

189. L'élasticité des liquides a donné lieu à de nombreuses controverses, car on a long-temps supposé que l'élasticité ne pouvait être produite que par une compression, et dans le même temps on considérait les liquides comme incompressibles, tandis qu'aujourd'hui on conçoit l'élasticité sans compression, et l'on sait, d'autre part, que les liquides sont sensiblement compressibles.

On apporte beaucoup de preuves de l'élasticité des liquides : 1° une pierre plate, lancée obliquement à la surface d'une eau tranquille, se réfléchit plusieurs fois en formant ce qu'on appelle des *ricochets*; 2° des gouttes de liquide, tombant d'une certaine hauteur dans une masse

du même liquide, rejaillissent au loin, et la même chose arrive si elles tombent sur un corps solide dépourvu d'élasticité. Ces exemples sont susceptibles d'objection; car, dans le premier cas, on peut dire que les ricochets sont dus à l'élasticité propre de la pierre, et dans le second, que les gouttes de liquide sont enveloppées d'une couche d'air qui peut produire les phénomènes d'élasticité.

Il existe une preuve de l'élasticité des liquides, qui est complètement démonstrative; c'est la propriété dont ils jouissent de transmettre les sons avec force et rapidité.

On peut distinguer deux sortes d'élasticité des liquides : l'une tient à la tendance qu'ils ont à conserver leur forme; et l'autre, à un véritable déplacement de leurs molécules par rapport à leur situation d'équilibre stable.

On observe une élasticité du premier genre lorsqu'une goutte de mercure se meut dans un vase à rebord. Si cette goutte de mercure vient à frapper sur le rebord du vase, elle s'aplatit d'abord, puis reprend bientôt sa forme première en s'éloignant avec une certaine vitesse du corps qui l'avait déprimée. Ce mode d'élasticité auquel on a voulu, dans ces derniers temps, attacher une grande importance, ne saurait produire que des effets très bornés, et ne se trouve mis en jeu que dans des circonstances très rares.

L'élasticité essentielle des liquides paraît être aussi parfaite et aussi énergique que celle de toute autre espèce de corps, puisque les vibrations sont transmises par les liquides rapidement et sans altération. On conçoit, en effet, qu'ils possèdent la condition essentielle de l'élasticité, puisque leurs particules sont dans un état d'équilibre stable entre des forces opposées. Il faut observer seulement que les molécules des liquides, étant parfaitement libres de se mouvoir les unes sur les autres, sans que les di-

stances réciproques de leurs molécules changent, il devient beaucoup plus difficile de mettre en jeu leur élasticité. Il est en effet, nécessaire, pour que cela arrive, que les liquides soient frappés ou agités avec une très grande vitesse, comme, par exemple, par les vibrations des corps sonores.

COMPRESSIBILITÉ.

190. Tous les corps liquides, et particulièrement l'eau, ont été long-temps considérés comme tout à fait incompressibles; on a même cru démontrer cette incompressibilité par la fameuse expérience des académiciens de Florence. Ceux-ci ayant, en effet, renfermé de l'eau dans une boule d'or, virent le liquide suinter à travers les pores du métal, ce qui supposait que ce liquide n'était point ou était très peu compressible. En 1756, le physicien anglais John Canton prouva, par des expériences directes, que l'eau et les autres liquides étaient compressibles : il détermina même la proportion de cette compressibilité pour différens liquides; il trouva, par exemple, que l'eau de pluie perdait, sous la pression atmosphérique, 46 millionièmes de son volume;

L'eau de mer 40 millionièmes;

L'huile d'olive 48 millionièmes;

L'esprit de vin 66 millionièmes;

Et enfin le mercure 3 millionièmes, c'est-à-dire à peu près en raison inverse de la densité des liquides.

Ces expériences firent pourtant peu d'impression : on fut porté à attribuer les résultats à quelques inexactitudes, si difficiles à éviter dans de pareilles recherches.

Dans ces derniers temps, MM. Œrstedt et Perkins ont démontré la compressibilité de l'eau par des méthodes qui

ne semblent laisser aucune incertitude, et dont les résultats coïncident avec ceux de Canton.

M. Ærstedt enferme de l'eau dans un vase de cristal cylindrique qui porte à son extrémité supérieure une virole en cuivre, au fond de laquelle se trouvent ajustés un petit corps de pompe et un piston du même métal : le piston qui repose immédiatement sur l'eau, peut être abaissé par une forte vis de pression. Pour juger de la compression que l'eau peut éprouver par ce mécanisme, il plonge dans l'intérieur de l'appareil un cylindre de verre plein d'eau et surmonté d'un tube délié, également rempli de ce liquide, mais dans lequel on introduit une goutte de mercure, qui y demeure stationnaire, à cause de l'étroitesse du tube. On mesure avec exactitude la capacité totale de cette espèce de thermomètre, et l'on place à côté du tube délié une échelle dont les degrés indiquent des millionièmes de ce volume total. On place encore dans l'intérieur de l'appareil un petit tube renversé, plein d'air et muni d'une échelle, comme un tube de Mariotte. Ce petit appareil sert à déterminer quelle est la pression actuellement exercée sur l'eau.

On voit que, d'après ces dispositions, l'eau contenue dans l'espèce de thermomètre intérieur doit être également comprimée, soit extérieurement, soit intérieurement, par l'eau contenue dans le grand vase; en sorte que s'il arrive, comme on l'observe en effet, que la goutte de mercure descende dans le petit tube à mesure que l'on comprime l'eau, ce ne peut être que par une diminution réelle du volume de l'eau intérieure.

On peut, au moyen de cet appareil, produire aisément des pressions équivalentes à 7, 8 et même 9 atmosphères, et l'on trouve que, pour chaque compression égale à une atmosphère, le volume de l'eau diminue à 45 millionièmes.

Il résulte encore de ces expériences et de celles que nous citerons tout à l'heure, que la compressibilité de l'eau est proportionnelle aux pressions.

On a d'abord fait usage d'eau privée d'air; mais on a bientôt reconnu que celle qui en contenait n'était ni plus ni moins compressible : ce qui suppose que les gaz en dissolution contractent eux-mêmes l'état liquide.

La seule objection que l'on puisse faire à cette expérience, est que les parois mêmes du vase de verre qui contient l'eau dont on observe la diminution du volume, étant pressées en dedans et en dehors, peuvent s'amincir et agrandir ainsi la capacité du vase; ce qui simulerait une diminution du volume du liquide, et ce qui exige une rectification.

M. Perkins, en employant de plus puissans moyens mécaniques, a réussi à comprimer l'eau de plus d'un vingtième de son volume. Il se sert d'un gros cylindre de bronze dans lequel est creusée une cavité. Une ouverture qui communique à cette cavité est fermée par une vis en acier, à travers laquelle est creusé un petit canal dans lequel joue un petit piston de même métal, dont les bords sont amincis de manière à s'appliquer exactement sur le corps de pompe, par l'effet même de la pression. Ce petit piston est mu par un levier très puissant, et la machine est munie d'une soupape de sûreté qui ne s'ouvre que quand la pression intérieure s'élève à 1120 atmosphères.

Pour juger de la pression exercée sur l'eau par ces moyens énergiques, M. Perkins introduit dans la cavité pleine d'eau du gros cylindre, un tube de verre calibré et gradué; il remplit ce tube d'eau jusqu'à un degré déterminé; il place au niveau de cette eau et en dedans du tube un petit cercle élastique et mobile, et par dessus un disque de cristal. Ce tube est renversé dans un petit vase plein

d'eau lui-même. Quand la compression s'opère, le disque de cristal s'approche du fond du tube en poussant devant lui le petit cercle élastique. Quand elle cesse, l'eau revient à son premier volume, le disque de cristal à sa première place; mais le petit cercle élastique reste à l'endroit où il avait été poussé, ce qui permet de juger de la compression éprouvée par l'eau, qui, par une expérience dont M. Clément a été témoin, s'est élevée à environ 0,06 de son volume.

Les résultats que nous venons de citer, correspondant à très peu près à ceux obtenus par Canton pour de l'eau pure, il est probable que ceux qu'il a donnés pour les autres liquides ne sont pas moins exacts.

DILATABILITÉ.

191. Les liquides sont dilatables par la cause générale qui semble produire le plus grand nombre des répulsions qu'on observe dans la nature, c'est-à-dire par l'action du calorique. Mais comme leurs molécules sont mobiles les unes sur les autres, cette dilatation a lieu avec égalité dans toutes les directions à la fois.

La quantité dont les liquides sont dilatés par une élévation donnée de température, est différente pour chacun d'eux, ce qui dépend de l'influence plus ou moins considérable de leur cohésion. Aussi les plus denses sont-ils, généralement parlant, les moins dilatables. Néanmoins, comme l'influence de la cohésion est infiniment moindre dans les liquides que dans les solides, on observe que la dilatation des premiers est beaucoup plus considérable que celles des seconds.

La puissance avec laquelle les liquides se dilatent est extrêmement considérable. On en peut juger par la grande

force qu'il faut employer pour les comprimer d'une très petite quantité (189).

Nous n'avons voulu donner ici qu'une idée générale de cette propriété. Des détails circonstanciés appartiennent à l'histoire du calorique.

CHAPITRE III.

DE L'APPLICATION DES LOIS DE LA MÉCANIQUE A L'ÉQUILIBRE ET AUX MOUVEMENS DES CORPS LIQUIDES.

192. Lorsque nous avons étudié, d'une manière abstraite, les lois de l'équilibre et du mouvement, nous avons supposé les différentes puissances appliquées soit à un seul point matériel, soit à plusieurs points matériels invariablement liés entre eux.

Lorsque nous avons appliqué ces principes abstraits à l'équilibre et au mouvement des corps solides, nous avons pu remarquer que ces sortes de corps réalisaient toujours l'une des deux suppositions que nous avions faites pour découvrir les lois, c'est-à-dire qu'ils présentaient constamment un plus ou moins grand nombre de points matériels liés entre eux d'une manière que nous pouvions supposer invariable, tant que le corps n'était pas brisé ou déchiré.

Dans l'application des mêmes principes aux corps liquides, il se présente une circonstance absolument opposée : en effet, les particules de ces corps sont essentiellement mobiles les unes sur les autres, et par conséquent ces corps n'offrent jamais le cas de points matériels liés entre eux, mais doivent, au contraire, être représentés comme composés d'un grand nombre de particules matérielles dont

chacune est libre d'obéir, à part et pour son compte, à l'impulsion des forces qui la sollicitent.

La mobilité des particules liquides peut être considérée comme absolue dans la plupart des expériences où l'on fait usage de l'eau. Cependant il faut remarquer que beaucoup de liquides, comme l'huile, par exemple, présentent une sorte de résistance au déplacement de leurs particules qui portent le nom de *viscosité*, et qui est susceptible d'influer beaucoup sur les phénomènes d'équilibre et de mouvement, comme nous le remarquerons en temps et lieu.

Cette liberté de mouvement est modifiée, dans les corps liquides, par une propriété essentielle de la matière qui la rend impénétrable, et d'où il résulte que, malgré la mobilité des particules, elles ne peuvent pourtant jamais venir occuper la place qui est déjà occupée par d'autres.

Les liquides étant compressibles, il paraîtrait que l'action des puissances qui animent leurs molécules pourrait les rapprocher les unes des autres. Mais comme cette compressibilité n'a d'effet sensible que sous l'influence de puissances très énergiques, nous considérerons d'abord les liquides comme incompressibles.

Si l'on se représente la constitution d'un corps liquide, mobile dans sa masse entière et dans toutes les directions, et mobile dans chacune de ses parties, qui peuvent se déplacer librement les unes par rapport aux autres, on concevra que rien n'est plus difficile que l'application des lois de la mécanique à l'équilibre et au mouvement de semblables corps; puisqu'on peut les considérer comme une réunion d'un nombre infini de petits corps indépendans qui peuvent se mouvoir, se communiquer le mouvement, et offrir des résistances dans toutes les directions possibles.

Il résulte de cette immense complication du problème,

que, jusqu'ici, les physiciens n'ont considéré que certains cas particuliers de l'équilibre et du mouvement des corps liquides. C'est ainsi qu'on a donné le nom d'*hydrostatique* à une partie de la physique, qui ne s'occupe réellement de l'équilibre des liquides que sous le point de vue de leur pesanteur, et qui, par conséquent, ne considère cet équilibre que dans un cas très particulier de statique. C'est ainsi qu'on a donné le nom d'*hydrodynamique* à une partie de la physique, qui ne s'est encore occupée que d'un très petit nombre de cas de mouvemens des corps liquides sollicités par leur pesanteur même. Tels sont les écoulemens par des orifices, les eaux jaillissantes, les courans des rivières, etc.

Puisqu'il n'existe pas de solution générale des problèmes d'hydrostatique et d'hydrodynamique, nous devrons nous borner à étudier le petit nombre de cas particuliers auxquels on a pu appliquer l'expérience ou le calcul, et nous considérerons successivement, parmi les cas d'équilibre :

1° L'équilibre d'une masse liquide sollicitée par une force d'attraction centrale.

2° L'état des surfaces libres des liquides contenus dans des vases.

3° Les pressions que les liquides exercent sur les parois des vases qui les contiennent.

4° Les effets de la pression des liquides sur les corps qui sont plongés dans leur intérieur.

5° Les effets de la *capillarité*.

Parmi les cas de mouvement :

1° Quelques mouvemens généraux des masses liquides.

2° L'écoulement des liquides par des orifices.

3° Le mouvement des liquides dans des canaux.

4° Les eaux jaillissantes.

5° Le choc et la résistance des liquides.
6° Les oscillations et les vibrations des liquides.

ÉQUILIBRE D'UNE MASSE LIQUIDE LIBRE.

193. Si nous supposons une masse liquide isolée au milieu de l'espace, et soustraite à l'influence de toute puissance extérieure, les molécules ne seront sollicitées que par l'attraction réciproque qui s'exerce entre elles, en raison directe de leurs masses qui doivent être égales, et inverse du carré de leurs distances. On démontre que dans cette circonstance la masse liquide affectera nécessairement une forme sphérique.

Admettons d'abord que la sphère soit réellement formée, nous trouverons qu'il y a équilibre entre toutes les forces qui sollicitent chaque molécule. En effet, on peut se représenter la sphère liquide comme formée d'une série de couches concentriques. Si l'on considère une molécule de l'une de ces couches, elle sera exactement en équilibre relativement aux attractions de toutes les molécules des couches extérieures, car on démontre géométriquement qu'une molécule située dans une sphère creuse est en équilibre dans tous les points de sa cavité.

En effet si l'on considère cette molécule comme réunissant les sommets de deux cônes opposés dont les bases sont à la surface sphérique, on trouvera que la surface de ces bases sera proportionnelle au carré de la hauteur des cônes, ou des distances de la molécule à la surface sphérique; mais, d'un autre côté, la force de l'attraction s'exerçant en raison inverse du carré de la distance, la surface quatre fois plus petite répondra à une distance moitié moindre à laquelle l'attraction sera quadruple : il y aura donc partout compensation, et la molécule sera

en équilibre. Cette molécule, au contraire, sera attirée par la somme des couches intérieures à la sienne, comme si l'attraction existait au centre. On peut en dire autant de toutes les molécules de l'une quelconque des couches de la sphère. Par conséquent cette couche pressera également la sphère intérieure dans tous ses points, dans le cas où le liquide est incompressible comme dans le cas contraire; et malgré la mobilité des particules liquides, la forme sphérique ne sera point altérée. Mais comme ce raisonnement peut s'appliquer à toutes les couches de la même sphère, il en résulte que les forces d'attraction ne peuvent pas changer la forme sphérique préexistante, et que par conséquent elles se trouvent en équilibre sous cette forme.

Il reste maintenant à démontrer que sous une autre forme que la sphère, le même équilibre ne serait pas possible; ce qui est extrêmement facile à concevoir. En effet, dans la forme d'un ellipsoïde, par exemple, ou dans toute autre, les particules d'une même couche concentrique se trouveraient les unes plus éloignées, les autres plus près du centre d'action, ce qui ferait nécessairement différer leurs forces de pression sur la sphère intérieure; d'où il résulterait un mouvement ou un changement de forme jusqu'à ce que l'équilibre se fût rétabli par la sphéricité.

Nous avons vu (25) qu'un grand nombre de faits vulgaires peuvent servir à démontrer par l'expérience, ce résultat de considérations abstraites, que tout liquide libre de toute influence extérieure affecte une forme sphérique.

Il existe une circonstance particulière dans laquelle on peut analyser le résultat de l'influence d'une force agissant sur une masse liquide, en même temps que l'attraction réciproque de ses particules. C'est le cas où la sphère liquide est animée d'un mouvement de rotation. Nous avons vu

que dans ce cas toutes les molécules, excepté celles qui sont situées dans l'axe, étaient animées de forces centrifuges différentes, suivant leur distance à l'axe, et qu'il en résultait une diminution plus ou moins considérable dans les forces de l'attraction centrale. On conçoit que, dans un semblable cas, l'équilibre doit être rompu, et que la sphère doit s'aplatir vers les extrémités de l'axe de rotation, et se renfler suivant le plus grand cercle de cette même rotation, jusqu'à ce que l'augmentation de la masse dans le sens du grand cercle vienne compenser la diminution de la force d'attraction.

Ces phénomènes se sont passés dans le globe terrestre, en supposant qu'il ait été liquide, et Newton avait calculé, d'après ces principes, que le diamètre de la terre, passant par les pôles, devait être à celui de l'équateur comme 229 est à 230; évaluation très supérieure à ce qu'on a trouvé par la mesure directe et par le pendule. Cette différence tient à ce que Newton supposait la terre homogène ou d'une même densité dans tous ses points, ce qui est loin d'être vrai, car la densité moyenne de la terre doit être, suivant le calcul, de 5,5, l'eau étant prise pour unité. La densité moyenne des corps situés à sa surface est à peine 2,5. En conséquence, la densité intérieure devrait être beaucoup plus grande; mais comme elle s'accroît lentement dans les différentes couches successives, il est probable qu'elle est extrêmement considérable vers le centre de la terre.

Si l'on connaissait la loi de l'augmentation de densité de la terre en s'approchant de son centre, on pourrait calculer l'aplatissement. Mais quoiqu'on ignore cette loi, on a trouvé que, quelle qu'elle soit, la somme de l'aplatissement aux pôles et de l'accroissement de la pesanteur aux mêmes lieux était égale à cinq fois la moitié du rapport

de la force centrifuge à la pesanteur sous l'équateur, ou l'aplatissement + l'accroissement de la pesanteur $= \frac{5}{2} \left(\frac{1}{289}\right)$;

Ou l'aplatissement seul $= \frac{5}{2} \left(\frac{1}{289} - 0{,}005315\right)$;

Ou $= \frac{1}{135{,}81}$.

On peut remarquer que pour la planète Mercure l'aplatissement déduit de la rotation est de 0,094, et que l'observation donne 0,057; d'où l'on peut conclure que la planète Mercure n'est point homogène. Ce fait présente sans doute un des exemples les plus remarquables des résultats extraordinaires auxquels le génie de l'homme peut parvenir.

ÉQUILIBRE DE LA SURFACE LIBRE DES LIQUIDES.

194. La surface libre d'un liquide quelconque, c'est-à-dire celle par laquelle il n'est en contact avec aucun corps solide, ne peut être en équilibre que quand elle est perpendiculaire à la résultante de toutes les forces qui sollicitent les particules.

Cette proposition importante est facile à démontrer; car si l'on suppose un moment que cette résultante soit oblique à la surface, elle pourra être décomposée en deux forces, dont l'une perpendiculaire à la surface, sera détruite par l'impénétrabilité, et l'autre, parallèle à cette surface, mettra les molécules en mouvement. Ce qui répugne à l'état d'équilibre.

Il résulte de la proposition précédente, que tous les liquides, sollicités par les forces de la pesanteur et contenus dans des vases quelconques, présentent une surface horizontale, c'est-à-dire perpendiculaire à la résultante des forces de la pesanteur, qui est toujours verticale.

Cette horizontalité constante des surfaces liquides est mise à profit dans une foule de circonstances où l'on em-

ploie ce que l'on nomme le niveau d'eau; cet instrument consiste en un tube, dont les extrémités, relevées à angle droit, sont en verre : en le remplissant d'eau on est sûr que les deux niveaux de l'eau, dans les deux extrémités, font partie d'une ligne horizontale.

On conçoit aisément que si l'on mêle des liquides de diverses densités, les plus lourds se placeront le plus bas, mais que chaque liquide offrira une surface horizontale.

Ce que l'on nomme verticale étant, pour chaque point de la terre, le prolongement du rayon qui passe par ce point, il en résulte qu'une surface liquide très étendue est une portion du sphéroïde que représente la terre, condition nécessaire pour que la surface soit partout perpendiculaire à la verticale. C'est le cas de la surface des mers ; mais pour une petite étendue de liquide, la surface peut être considérée comme plane, puisque nous considérons les verticales voisines comme parallèles.

DE L'ÉQUILIBRE DES LIQUIDES CONTENUS DANS UN VASE.

195. Tout liquide actuellement contenu dans un vase ouvert à parois solides doit remplir la condition générale de présenter une surface libre horizontale ; mais, indépendamment de cette circonstance, ce liquide exerce des pressions diverses sur les différens points du vase qui le contient. Il est important d'étudier le mode et la valeur de ces différentes pressions, et, ponr s'en faire une idée exacte, il faut considérer d'abord que toutes les particules du liquide étant supposées parfaitement mobiles les unes sur les autres, les pressions qu'elles peuvent éprouver doivent se transmettre avec égalité dans toutes les directions : s'il arrivait, en effet, que dans un point quelconque il y eût une moindre pression, les molécules qui se trouveraient ailleurs plus fortement comprimées se porteraient

vers ce point, ce qui ne tarderait pas à rétablir l'uniformité supposée.

Une autre considération non moins importante pour l'intelligence du sujet qui nous occupe, c'est que, dans une masse liquide en équilibre, si l'on isole, par la pensée, une portion quelconque de la masse, cette portion, prise à part, se trouvera en équilibre comme tout le reste. Imaginons, par exemple, qu'au milieu d'une masse d'eau contenue dans un vase il se forme tout à coup de la glace, de manière à ce qu'il ne reste à l'état liquide qu'un certain volume cylindrique vertical, il est évident que cette solidification partielle ne changera rien à l'état mécanique de la masse, et que le cylindre liquide sera en équilibre après comme avant.

Ayant établi les deux principes généraux qui président à l'équilibre des liquides contenus dans un vase, nous concevrons d'abord que toute pression étrangère exercée sur un liquide dans cette situation, sera transmise par le liquide avec une parfaite égalité dans toutes les directions.

Quant aux pressions exercées par le poids même du liquide, nous devons les considérer, par rapport au fond du vase, par rapport à ses parois latérales, et enfin par rapport à ses parois supérieures quand il en présente.

DE LA PRESSION DES LIQUIDES SUR LA PAROI INFÉRIEURE DES VASES.

196. Lorsqu'un liquide est contenu dans un vase, on conçoit que la paroi inférieure de ce vase doit nécessairement supporter la totalité ou une grande partie du poids du liquide contenu, puisque toutes les forces de la pesanteur sont dirigées verticalement du haut en bas, puisque le liquide est impénétrable, et qu'enfin la paroi inférieure offre

un obstacle insurmontable à la chute du liquide : néanmoins, ce poids, supporté par la paroi inférieure, offre des particularités remarquables.

Si nous supposons un vase cylindrique, dont les parois latérales soient verticales, comme dans la figure 63, il est évident que la base AB supportera la totalité du poids du liquide contenu dans le vase, puisqu'en effet des parois verticales ne sauraient rien ajouter ni rien ôter à ce poids. Si donc on connaît la pesanteur spécifique du liquide, il suffira de multiplier la surface de la base par la hauteur AD du liquide, pour avoir son volume, qui, multiplié par la densité, donnera le poids total.

Si le vase dans lequel le liquide est contenu présente une paroi inférieure AB, semblable à la précédente ; mais que le vase, au lieu d'être cylindrique, s'élève en s'élargissant comme dans la figure 64, nous disons que la pression exercée sur la base AB sera exactement la même que dans le cas précédent. En effet, on peut supposer qu'au milieu du vase AEFD, on introduise un cylindre creux de métal ADCB; on peut admettre que tout le liquide extérieur à ce cylindre se congèle, et nous savons qu'en pareil cas les conditions d'équilibre ne sont pas changées; par conséquent, la pression de toute la masse d'eau liquide sur la base est toujours représentée par le poids du cylindre ABCD, et le surplus de la masse d'eau est supporté par les parois obliques AF et BF.

Si l'on suppose que, la surface horizontale restant la même, le vase soit beaucoup plus étroit dans sa partie supérieure, comme dans la figure 65, nous disons que la pression sur la base restera encore la même. En effet, si nous supposons, au milieu de la masse de liquide, un petit tube recourbé *abc*, le liquide devra, d'après nos principes, se trouver en équilibre dans ce tube. Cependant la

colonne *b a* est évidemment beaucoup plus haute que la colonne *b c*; il faut donc que la paroi D E presse la petite colonne *b c* avec une force suffisante pour compenser l'excès de poids de la colonne *b a*. C'est ce qui arrive en effet, et cette pression est transmise à la surface inférieure A B; et comme on peut en dire autant de tous les points de la paroi supérieure D E, il en résulte que la pression sur la base A B se trouvera composée du poids réel de la petite colonne E, plus de la réaction de toute la paroi supérieure D E; c'est-à-dire que la pression sera la même que si la colonne de liquide avait le même diamètre dans toute sa hauteur.

Quelle que soit la forme du vase, comme dans les figures 66 et 67, le même raisonnement s'applique, et donne, à l'aide du calcul, exactement le même résultat. D'où l'on conclut cette loi générale, que *les surfaces horizontales sont pressées par les liquides en raison de leur surface, multipliée par la hauteur de la colonne.*

On trouve dans ce phénomène des pressions une sorte de paradoxe, savoir, que, si l'on pèse l'eau de l'appareil de la figure 63, on trouve que le poids de cette eau est bien inférieur à la pression qu'elle exerce sur le fond du vase, et que cette pression peut même excéder de beaucoup le poids total de l'appareil; en sorte que, si l'on plaçait l'appareil sur le plateau d'une balance, cet appareil pourrait n'exercer qu'une pression de 10 livres sur le plateau, tandis que la pression sur le fond du vase serait de 100 livres. On concevra cette contradiction apparente, en considérant que les pressions exercées sur la paroi inférieure et sur la paroi supérieure se contrebalancent, et deviennent de nul effet, pour faire descendre l'une ou monter l'autre; elles tendent seulement à les écarter l'une de l'autre. On peut, en effet, faire éclater un tonneau plein d'eau

et très solide, en le surmontant d'un très petit tube fort élevé, que l'on peut remplir avec une pinte d'eau : on conçoit que la pression intérieure doit être évaluée en multipliant la surface intérieure du tonneau par la hauteur de la petite colonne.

On a mis à profit les principes que nous venons d'établir, dans un instrument nommé presse hydraulique, dans lequel, à l'aide d'un puissant levier agissant sur le piston d'un corps de pompe très étroit, on force l'eau à passer dans un corps de pompe très large, dont le piston se trouve soulevé avec une force qui est à celle employée comme la surface du grand piston est à la surface du petit. Les lois que nous venons d'énoncer se prouvent par expérience, comme nous le verrons dans l'art. suivant.

PRESSION DES LIQUIDES SUR LES PAROIS LATÉRALES DES VASES.

197. Les liquides pressent sur les parois latérales des vases avec une force qui est exprimée par le poids d'une colonne de liquide qui aurait pour base la surface de la paroi, et pour hauteur la distance du centre de cette paroi au niveau du liquide.

On concevra cette vérité, si l'on se représente, *fig.* 68, un petit canal angulaire *a b c*; car il est évident que la petite surface *c* sera pressée en vertu de la hauteur *a b*, et que l'on peut en dire autant de chaque point de la surface : or, la surface sera la somme de toutes les petites parties semblables à *c*, et la hauteur moyenne sera celle qui répond au centre de la surface.

On démontre l'égalité de pression des liquides dans tous les sens, leur mode de pression sur les surfaces horizontales inférieures et leur pression sur les parois latérales, au moyen de la machine de Pascal : elle consiste principale-

ment en un piston très mobile dans un corps de pompe, dont on fait varier la direction à volonté, et qui reçoit la pression des diverses colonnes liquides, tandis qu'il est retenu par une tringle qui répond au fléau d'une balance; on constate la pression exercée sur le piston par les poids qu'il faut mettre dans le plateau de la balance pour lui faire équilibre. On peut remarquer que les liquides pressant les parois latérales des vases qui les contiennent, il semble singulier que ces pressions ne produisent aucun mouvement dans ces vases, même quand ils sont librement suspendus; mais il est évident que ce repos est un équilibre entre des pressions qui sont nécessairement égales et opposées les unes aux autres, quand le liquide est de niveau dans les vases. Il y a cependant une circonstance où cet équilibre est rompu : c'est le cas où l'on fait une ouverture à l'une des parois; le liquide s'écoule par cette ouverture, et la pression manquant dans ce point, celle qui lui est opposée l'emporte, et le vase, supposé mobile, est repoussé dans le sens opposé au jet du liquide.

On peut, à l'aide de ce mécanisme, faire tourner sur son axe un tube plein d'eau, muni de petits tubes recourbés par lesquels l'eau s'écoule.

PRESSION DES LIQUIDES SUR LES PAROIS HORIZONTALES SUPÉRIEURES.

198. Les liquides pressent les parois horizontales supérieures, en raison de leur surface et de la hauteur de la colonne au dessus de cette paroi.

On démontre ce fait d'une manière très simple, au moyen d'un petit instrument dont la figure 69 donne une idée. Si le vase AB est rempli d'eau, ainsi que la colonne *a b*, nous disons que la surface supérieure est pressée en *c* par la

colonne *ab*. En effet, si dans le point *c* on pratique un petit tube vertical garni d'un robinet, le liquide s'élèvera, au moment de l'ouverture du robinet, jusqu'au point *d*, qui sera de niveau avec le point *a* : par conséquent le point *c* était, avant cette ouverture, pressé avec une force capable d'élever l'eau à cette hauteur; et, quel que soit d'ailleurs le nombre des tubes verticaux que l'on dispose de cette manière, l'eau s'y élèvera également.

DE L'ÉQUILIBRE DES LIQUIDES DANS LES VASES COMMUNIQUANS.

199. Lorsqu'un liquide est contenu dans un certain nombre de vases communiquant les uns avec les autres par des canaux quelconques, ce liquide se maintient exactement au même niveau dans tous les vases, quelles que soient d'ailleurs leurs capacités, leurs formes ou leurs directions. Par exemple, dans la *fig.* 70, le grand vase A, le tube vertical B, le tube sinueux C et le tube oblique D, communiquant ensemble par le canal *a b*, le liquide se trouve au même niveau dans toutes ces capacités diverses; ce qui découle comme conséquence naturelle des principes que nous avons établis. En effet, si nous supposons le tuyau A B divisé par un diaphragme au point *a*, il faudra, pour que l'équilibre ait lieu, que les pressions exercées sur les deux faces de ce diaphragme soient parfaitement égales; ce qui ne saurait exister que dans le cas où les hauteurs des liquides au dessus du point seraient au même niveau.

S'il arrivait qu'un des tubes verticaux ne s'élevât pas jusqu'au niveau du liquide dans le vase principal, ce liquide s'échapperait en jaillissant par l'ouverture, et tendrait à s'élever seul jusqu'au niveau des vases, sans pourtant y parvenir, pour des raisons que nous expliquerons en traitant des eaux jaillissantes.

Les principes que nous avons établis sur l'équilibre et les pressions des liquides expliquent un grand nombre de phénomènes naturels relatifs aux fontaines, aux sources et aux puits.

La partie superficielle de la masse du globe que nous habitons est le plus souvent formée de couches superposées, de nature différente; la plupart de ces couches sont pénétrables à l'eau de toutes parts : tels sont les sables, les cailloux, etc; d'autres, au contraire, sont impénétrables à l'eau, et l'argile est dans ce cas. Cette diversité forme dans l'intérieur du globe des espaces plus ou moins étendus que l'eau peut librement parcourir, tandis qu'elle ne saurait passer à travers des bancs plus ou moins épais qui circonscrivent ces espaces. Si, par exemple, *fig.* 71, il existait sur une montagne, au point A, un lac d'une certaine étendue; si la couche A B C était formée de sable, et la couche *a b c* d'argile, l'eau du lac, située en A, pourrait s'échapper au point C en formant une fontaine jaillissante. On en observe un grand nombre, même sur des lieux très élevés, dont l'existence ne saurait être rapportée à une autre cause.

Les fontaines qui surgissent si fréquemment du flanc des montagnes dépendent de l'existence de certaines couches d'argile qui empêchent l'eau des pluies de pénétrer toute la masse des montagnes, et la forcent à se diriger, suivant leurs pentes, jusqu'au point où elle trouve une issue.

Il arrive quelquefois qu'en creusant dans la terre, avec une sonde, un trou suffisamment profond, il se forme par cette ouverture une fontaine qui continue de couler et s'élève même à une certaine hauteur; il est évident que, dans ce cas, on a percé une couche profonde d'argile qui empêchait l'eau de s'élever, comme il arriverait si, dans la *fig.* 71, on perçait un trou dans la direction *d e*.

Il arrive souvent qu'en cherchant à se procurer de l'eau, on creuse un puits jusqu'à une très grande profondeur, sans parvenir à en rencontrer, mais que tout à coup l'eau vient à abonder dans ce puits, et s'y élève assez rapidement pour surprendre les ouvriers et causer des accidens. On voit ainsi l'eau s'élever, dans ce puits profond, jusqu'au voisinage de la surface de la terre; ce phénomène est dû aux mêmes causes que nous venons de signaler.

On a imaginé, et l'on pratique actuellement sur beaucoup de points de la France, un genre particulier de puits nommés *artésiens*, qui consistent en un trou pratiqué verticalement à l'aide d'une sonde, et dans lequel on fait descendre successivement des tuyaux jusqu'à une très grande profondeur. On parvient ainsi jusqu'à une ou plusieurs centaines de pieds, et il est rare qu'on ne rencontre pas quelque nappe d'eau située sous de l'argile et suffisamment comprimée pour qu'elle s'élève et jaillisse par l'ouverture supérieure.

Nous avons en ce moment dans Paris même des exemples remarquables de ce phénomène. MM. Flachat fils viennent de pratiquer à la gare de St.-Ouen une fontaine jaillissante de cette espèce, qui fournit un très grand volume d'eau.

Jusqu'ici nous avons supposé que, dans les vases communiquans, les liquides étaient les mêmes; mais il est évident que, si l'un des vases est occupé par un liquide plus pesant que celui qui remplit l'autre vase, pour que l'équilibre s'établisse il faudra que les deux colonnes soient inégales en hauteur, et ces hauteurs devront être réciproquement proportionnelles à la densité des liquides. Si, par exemple, *fig.* 72, le double siphon A B C contenait dans la partie A B de l'eau ordinaire, et dans la partie B C de l'acide sulfurique concentré, la première colonne

devrait être presque double de la seconde, tandis que si l'une était d'eau et l'autre de mercure, le rapport devrait être de 14 à 1. C'est ainsi que 32 pieds d'eau font équilibre à 28 pouces de mercure, et 28 pouces de mercure à la hauteur de l'atmosphère, qui peut être d'environ 52,000 mètres.

PRESSION DES LIQUIDES SUR DES CORPS QUI SONT PLONGÉS DANS LEUR INTÉRIEUR.

200. Tout corps entièrement immergé dans un liquide perd nécessairement de son poids une quantité précisément égale au poids d'un volume de liquide semblable au sien. Cette importante proposition est une suite nécessaire des lois que nous avons établies : en effet, supposons, *fig.* 73, un cube, d'une matière solide quelconque, entièrement plongé dans l'eau : les pressions que pourront éprouver ses quatre faces latérales n'influeront en aucune manière sur sa pesanteur. La face inférieure de ce cube sera pressée de bas en haut avec une force égale au poids d'une colonne d'eau, qui aurait pour base cette surface du cube, et pour hauteur la distance *b n*, au niveau de l'eau. La face supérieure du cube sera pressée avec une force égale au poids d'une colonne d'eau, qui aurait pour base cette surface du cube, et pour hauteur la distance *a n* au niveau de l'eau. Ces deux pressions sont opposées et sont inégales ; la pression inférieure est la plus considérable, et la différence qui existe entre elles est représentée par une colonne d'eau, qui aurait pour base la surface du cube, et pour hauteur la ligne *b a*, c'est-à-dire qu'elle est représentée par le volume même du cube, et que, par conséquent, ce cube est soulevé par une force égale au poids d'un volume d'eau précisément égal au sien.

Ce raisonnement pouvant s'appliquer, avec les modifications et les calculs convenables, à tous les corps, de quelque forme qu'ils soient, la proposition demeure démontrée.

Il résulte de ce que nous venons de dire, que si un corps solide était justement aussi lourd qu'un pareil volume d'eau, il pourrait rester indifféremment dans les différens points d'une masse d'eau, sans jouir d'aucune pesanteur sensible. Cette égalité parfaite étant presque impossible, tous les corps solides s'enfoncent dans l'eau quand ils sont plus pesans qu'un semblable volume de ce liquide, ou s'élèvent à la surface quand ils sont plus légers.

DE L'ÉQUILIBRE DES CORPS FLOTTANS.

201. Lorsque le poids total d'un corps solide quelconque est moins considérable que le poids de son volume d'eau, il est évident que ce corps ne saurait s'enfoncer dans le liquide; il arrive, au contraire, qu'une partie du corps s'élève au dessus du niveau de l'eau, et c'est ce qu'on exprime par l'expression de *flotter*.

On conçoit qu'un corps plus léger que son volume d'eau devra néanmoins s'enfoncer de quelque chose dans le liquide, ce qui arrivera jusqu'à ce qu'il ait déplacé un certain volume d'eau, dont le poids soit égal au sien propre. Si, par exemple, *fig.* 74, le cube C était fait d'une matière moitié moins pesante que l'eau, il devrait s'enfoncer dans ce liquide jusqu'à la moitié de sa hauteur, puisqu'un demi-cube d'eau pèserait autant que le cube tout entier de la matière supposée. Les corps flottans sont donc en équilibre entre deux puissances opposées; savoir : leur propre poids, qui tend à les faire descendre, et la pression du liquide de bas en haut, qui tend à les faire monter.

Les particules du liquide sur lequel un corps flotte étant éminemment mobiles, il en résulte que l'équilibre du corps flottant ne peut être stable que dans des conditions déterminées : la principale est que le centre de gravité du corps flottant soit placé au dessous du centre de gravité de la masse d'eau qu'il déplace. Par exemple, dans la *fig.* 75, le corps A B D sera dans un équilibre stable, si son centre de gravité se trouve placé au point C; tandis que le centre de gravité de la masse liquide déplacée serait placé au point C'. Cette condition est tout à fait analogue à celle du point de suspension du fléau d'une balance, dont nous avons parlé (132) : car la pression du liquide autour du corps se résout en une résultante dont l'action est appliquée au centre de gravité de la masse A B D, et les choses se passent comme si le corps était suspendu par le centre de gravité C'. On voit, en effet, que le centre de gravité C du corps est placé le plus bas possible, et que toutes les oscillations tendraient à l'élever; si, au contraire, le centre de gravité était en C'', l'équilibre mathématique aurait lieu tant que la ligne C'', C', B serait verticale; mais au moindre mouvement le centre de gravité C'' pourrait descendre.

On voit assez, par tout ce que nous venons de dire, que l'équilibre stable doit être difficile ou impossible pour les corps homogènes dont une grande partie s'élève au dessus du niveau de l'eau : c'est ainsi qu'une pièce de bois peut acquérir un équilibre stable quand elle est couchée horizontalement sur l'eau, tandis que cet équilibre est impossible dans la position verticale. C'est pour obvier à ces inconvéniens que l'on a coutume de lester les bâtimens, c'est-à-dire, de placer un poids considérable dans la partie la plus inférieure, afin d'abaisser autant que possible le centre de gravité de leur masse totale.

Il est facile, sans changer la masse d'un corps flottant, d'augmenter, pour ainsi dire, à volonté, le volume d'eau que ce corps peut déplacer; il suffit pour cela de lui donner une forme concave, ou de le rendre propre à renfermer un certain volume d'air, dont la pesanteur absolue peut être regardée comme nulle et dont le volume est déterminé par la résistance des parois solides. Sur cet artifice très simple est fondé tout l'art des constructions nautiques. L'effet de ce moyen peut être porté si loin, que les substances les plus lourdes servent à construire des bâtimens légers capables de supporter eux-mêmes de grands fardeaux additionnels : c'est ainsi que nous avons vu un bateau à vapeur, construit tout en fer, rivaliser de vitesse avec des bâtimens construits en bois. On a profité aussi de cette circonstance pour construire les bouées avec des boules creuses de métal qui restent flottantes à la surface des fleuves et de la mer.

La quantité dont un corps flottant s'enfonce dans un liquide pour trouver sa situation d'équilibre, ne dépend pas seulement de la pesanteur absolue du corps, mais elle dépend aussi du poids spécifique du liquide déplacé; ainsi, presque tous les corps, excepté l'or et le platine, flottent sur le mercure et n'en déplacent pourtant qu'un très petit volume, ou ne s'y enfoncent que très peu. Le bois, les huiles grasses, flottent sur l'eau pure et s'enfoncent dans l'alcool, un œuf s'enfonce dans l'eau pure et surnage l'eau saturée du sel.

La natation offre de fréquentes applications des principes que nous venons d'établir. Les poissons sont munis d'une vessie plus ou moins remplie d'air et qui, en faisant varier le volume total de leur corps, leur permet de s'élever à la surface des eaux ou de s'enfoncer dans leur profondeur : elle leur procure aussi, par sa situation, l'avantage d'une

position convenable dans le liquide, en modifiant celle de leur centre de gravité.

L'homme, lui-même, dont la structure n'est nullement propre à la natation, dont le poids spécifique est un peu plus grand que celui de l'eau, et dont la tête est relativement encore plus pesante, peut profiter, indépendamment des mouvemens propres à cet art, de l'air qu'il introduit dans la poitrine par une grande respiration, pour se rendre spécifiquement plus léger. On se sert en physique d'un petit instrument nommé *ludion*, pour démontrer les effets de la variation du volume sur l'équilibre des corps flottans. Cet instrument consiste en une petite figure d'émail suspendue à une ampoule de verre contenant de l'air, qui ne peut s'en échapper que par l'ouverture de l'ampoule, qui est tournée inférieurement. Le tout est plongé dans un tube de cristal plein d'eau, dont la partie supérieure est garnie d'un fond et d'une virole en cuivre avec une vis de pression, qui peut, à volonté, comprimer l'eau du vase. Si par l'effet de cette vis on comprime en effet l'eau, celle-ci comprime à son tour l'air contenu dans l'ampoule, son volume diminue et la figure descend; si la pression diminue, le volume de l'air augmente et la figure remonte : on peut même s'assurer ainsi que l'équilibre exact est impossible; car on ne parvient jamais à fixer la petite figure dans le milieu de la colonne liquide.

DES ARÉOMÈTRES.

202. Le mot Aréomètre signifie proprement mesure de la légèreté; et, en effet, ces instrumens ont d'abord été imaginés pour apprécier de combien un liquide était plus léger que l'eau; on a depuis étendu leur usage à des liquides plus lourds, et maintenant on peut dire que les aréo-

mètres présentent un des moyens les plus commodes et les plus usités de déterminer le poids spécifique des liquides et même des solides.

Un aréomètre est un instrument qui indique, soit par le degré de son immersion, soit par les poids qui la produisent, le poids relatif d'un volume de liquide. On peut en distinguer de deux espèces : les uns s'enfoncent toujours complètement dans le liquide; les autres s'y enfoncent à divers degrés, suivant la densité du liquide.

Aréomètre de Fahrenheit. Cet instrument, qu'on a aussi nommé *aréomètre universel*, peut servir à déterminer les poids spécifiques de tous les liquides, excepté le mercure; on le construit de verre ou en métal : il présente la forme générale indiquée (*fig.* 76). A, est une sphère creuse d'un assez grand volume; D, une petite sphère qu'on remplit de mercure pour lester l'instrument et le maintenir dans une position verticale; C, est une tige fort mince sur laquelle on marque par un trait le point fixe d'immersion; B, est un petit plateau sur lequel on peut déposer des poids.

Le poids total de cet instrument doit être tel, relativement à son volume, qu'il ne puisse pas s'enfoncer de lui-même dans le liquide le plus léger; du reste, ce poids absolu doit être connu avec beaucoup d'exactitude. Cela posé, si l'on plonge l'instrument dans de l'eau pure, on pourra, en ajoutant des poids convenables sur le plateau B, faire plonger l'instrument exactement jusqu'au point C. Il est évident que, dans ce cas, le poids connu de l'instrument, plus les poids additionnels qu'il a fallu employer représentent exactement le poids d'un volume d'eau égal à celui de la machine. Si, maintenant, on vient à plonger le même instrument dans un liquide plus léger que l'eau, il faudra ajouter moins de poids pour le faire plonger jus-

qu'au point C. Si on le plonge dans un liquideplus lourd que l'eau, il en faudra ajouter davantage; et comme, dans tous les cas, le volume du liquide déplacé est toujours exactement le même, on obtiendra les rapports de poids d'un même volume de différens liquides, c'est-à-dire leur poids spécifique. Si, par exemple, l'instrument et les poids additionnels formaient ensemble mille grains, l'instrument étant plongé dans l'eau, et que ce total formât 1800 grains avec l'acide sulfurique, on dirait que le poids de l'eau est à celui de l'acide comme 1000 est à 1800.

Ces sortes de mesures sont susceptibles d'une grande exactitude, seulement il est indispensable que les liquides que l'on compare soient exactement à la même température, tant pour que les liquides ne changent pas de poids spécifique, que pour conserver à l'instrument lui-même précisément le même volume.

Nicholson a imaginé d'employer cet instrument à la détermination du poids spécifique des solides; il suffit pour cela de suspendre à son extrémité inférieure (*fig.* 77) un petit plateau susceptible de supporter le corps solide, qui ne doit avoir qu'une petite masse. En effet, connaissant le poids nécessaire pour déterminer l'immersion de l'instrument dans l'eau pure, on pourra d'abord peser le corps dans l'air, en le plaçant sur le plateau supérieur et en cherchant le poids qu'il faudra ajouter en sus du sien pour produire l'immersion. Si, par exemple, le poids nécessaire était mille grains, et qu'on fût obligé d'ajouter trente grains en sus du corps, on conclurait qu'il en pèse neuf cent soixante et dix; mais si, ensuite, on place ce corps dans le plateau inférieur, il perdra dans l'eau un poids égal à celui de son volume d'eau, et on sera obligé d'ajouter aux mille grains primitifs dont son poids fait partie, un certain nombre de grains pour produire l'immersion de l'instrument.

Si ce poids à ajouter était 97, on en conclurait que sa pesanteur spécifique est 10, l'eau étant prise pour unité. Cette méthode est susceptible d'exactitude jusqu'à un trentième de grain; elle est très commode pour reconnaître les pièces de monnaie fausses, dont le poids spécifique est presque toujours moindre que celui de l'or ou de l'argent.

Charles a imaginé un moyen d'appliquer la balance de Nicholson aux corps plus légers que l'eau : il suffit d'employer (*fig.* 78), au lieu du plateau inférieur, un petit entonnoir métallique renversé et percé de trous, sous lequel on place le corps. On conçoit que, dans ce cas, il devient nécessaire d'ajouter plus de poids que de coutume sur le haut de l'instrument, et que le poids spécifique devient une fraction de l'unité.

Aréomètres à tiges. On donne souvent à ces aréomètres le nom de *pèse-liqueur;* le plus usité est celui de Baumé. On en construit pour les liquides plus légers que l'eau, et pour les liquides plus pesans. Ils n'exigent l'emploi d'aucun poids additionnel; ils sont beaucoup plus commodes et beaucoup moins exacts que les précédens. Ces aréomètres sont formés (*fig.* 79) d'une sphère vide A, d'une petite sphère D, pleine de mercure ou de petits plombs pour lester l'instrument; enfin, d'une tige cylindrique B C, dans l'intérieur de laquelle se trouve une échelle graduée, comme nous le dirons tout à l'heure.

Si nous supposons qu'un pareil instrument soit construit de manière à s'enfoncer dans l'eau pure jusqu'au point B, et qu'ensuite on le plonge dans un liquide plus léger que l'eau, il devra s'y enfoncer davantage; mais la tige B C ayant un diamètre considérable, déplacera un volume de liquide d'autant plus grand que l'instrument s'enfoncera davantage; en sorte qu'il pourra venir un moment où le poids de ce volume de liquide déplacé sera égal au poids de

l'instrument, et alors celui-ci cessera de s'enfoncer. On pourra marquer ce point sur la tige, et en agissant ainsi sur plusieurs liquides de poids spécifiques différens et connus, se procurer des aréomètres, qui serviront ensuite, par le seul degré de leur immersion, à reconnaître ces poids spécifiques dans les liquides inconnus. C'est, en effet, de cette manière que l'on construit les pèse-liqueurs.

Pour les liquides plus légers que l'eau, l'esprit-de-vin par exemple, on marque au bas de la tige le point où l'instrument s'arrête dans de l'eau pure, on marque en haut de la tige le point où l'instrument s'arrête dans de l'alcool rectifié, on prend cet intervalle avec un compas, et on le reporte sur une bande de papier. On est convenu de marquer 10 le point inférieur, on divise l'intervalle en 30 parties égales que l'on nomme *degrés;* et quand l'échelle est construite et tracée à l'encre, on roule la bande de papier suivant sa longueur et on l'introduit dans la tige de verre, en faisant correspondre les points extrêmes sur l'échelle, avec les deux marques faites sur la tige : on ferme alors à la lampe l'extrémité supérieure du tube, et l'on a un aréomètre qui sert à reconnaître approximativement les poids spécifiques des liquides plus légers que l'eau, et qui s'enfonce, par exemple, jusqu'à vingt-deux degrés dans l'eau-de-vie ordinaire.

On agit de la même manière pour les liquides plus pesans que l'eau. Baumé se servait d'une dissolution contenant des poids connus de sel marin. On fait souvent usage de l'acide sulfurique concentré qui donne le point inférieur de l'échelle, tandis que l'eau donne le point supérieur, et l'on divise l'intervalle en 66 parties.

Il est facile de concevoir que ces sortes d'aréomètres sont d'autant plus sensibles, que leur tige est plus fine; aussi en construit-on de très déliés pour des cas particuliers; par

exemple, pour reconnaître les différences de poids spécifiques du lait, du vin, du moût de raisins, etc.

DE L'ÉQUILIBRE DES LIQUIDES DANS DES ESPACES CAPILLAIRES.

203. Nous avons vu que dans des vases ordinaires communiquans, les liquides homogènes se mettaient de niveau; il n'en est pas de même dans des vases très étroits qui communiquent avec des vases larges, car alors le liquide se tient presque toujours ou plus haut ou plus bas dans le vase étroit; et comme cette différence devient très sensible dans des tubes très fins ou entre des surfaces très rapprochées, on a nommé ces phénomènes *capillaires*, comparant ainsi à l'épaisseur d'un cheveu les intervalles dans lesquels ils se développent.

Les phénomènes capillaires sont d'une grande importance par la multiplicité des circonstances dans lesquelles on les observe; ils intéressent surtout le physiologiste, parce qu'on peut en faire d'heureuses applications à certains phénomènes des êtres organisés.

Nous énoncerons d'abord les faits d'observations : nous dirons ensuite la loi qui y préside et l'explication qu'on en donne; enfin, nous en chercherons les applications.

Lorsqu'un corps est en partie plongé dans un liquide, le niveau de ce liquide est élevé ou abaissé dans les points de contact avec le corps, et il en résulte une courbe concave dans le premier cas, et convexe dans le second. L'élévation est produite par les corps qui peuvent être mouillés par le liquide; l'abaissement est produit par les corps qui ne peuvent pas être mouillés par ce même liquide. Il n'y a qu'un très petit nombre de corps qui n'offrent pas ces phénomènes, tel est l'acier plongé dans l'eau.

Si l'on rapproche deux corps plongés dans un liquide,

et autour desquels ce liquide forme des courbes concaves ou convexes, lorsque le rapprochement est suffisant pour que les deux courbes se rencontrent, le niveau du liquide s'élève entre les deux corps : cette élévation est d'autant plus grande que la distance entre les corps est plus petite.

Dans un vase cylindrique le liquide s'élève ou s'abaisse en courbe concave ou convexe le long de ses parois, comme on le voit pour l'eau ou pour le mercure contenu dans un vase de verre.

Si l'on plonge dans un vase plein de liquide un tube de verre d'un diamètre assez petit pour que la courbure qui se forme à sa circonférence intérieure s'étende jusqu'à son centre, le liquide s'élève ou s'abaisse dans l'intérieur du tube au dessus ou au dessous du niveau du liquide dans le grand vase ; si le tube est cylindrique, l'élévation ou l'abaissement est en raison inverse du diamètre; si le tube est prismatique, ces phénomènes sont en raison inverse du périmètre. Dans un tube cylindrique, la surface du liquide est sensiblement une demi-sphère concave ou convexe. Entre deux lames planes que l'on rapproche, l'élévation est moitié moindre que dans un tube cylindrique, dont le diamètre égalerait l'intervalle des deux lames; la surface du liquide est un demi-cylindre concave ou convexe.

Ces phénomènes ont lieu dans le vide comme dans l'air, ils ne sont nullement influencés par l'épaisseur des parois des tubes ou des vases. Les corps divers susceptibles d'être mouillés, et qui l'ont été, élèvent tous le liquide à la même hauteur, dans des circonstances semblables. Enfin l'élévation ou l'abaissement des liquides, dans des espaces capillaires, n'a aucun rapport avec la densité du liquide : ainsi l'eau, par exemple, s'élève plus haut que l'alcool.

Les phénomènes que nous venons d'énoncer se reproduisent aisément par les plus simples expériences. Si l'on

plonge dans l'eau deux cubes de verre, on voit ce liquide s'élever autour d'eux en formant une courbe concave; si l'on rapproche deux de leurs faces, l'eau s'élève aussitôt entre elles. Si la même expérience se fait dans le mercure, celui-ci forme une courbe convexe et s'abaisse dans l'intervalle des corps rapprochés. La même chose arrive entre des lames de verre. Un tube de verre étroit étant plongé dans une masse d'eau, ce liquide s'élève et se maintient dans le tube au dessus du niveau extérieur; si le tube est enduit d'un corps gras, l'eau s'abaisse et se maintient dans le tube au dessous du niveau extérieur. La même chose arrive si le tube de verre est plongé dans du mercure. Si l'on construit un siphon renversé, dont l'une des branches soit large, et l'autre capillaire, en y versant de l'eau ce liquide se tiendra beaucoup plus haut dans le tube capillaire que dans le tube large; si l'on y verse du mercure, celui-ci se tiendra beaucoup plus bas dans le tube capillaire que dans le tube large.

Il est évident que tous ces effets remarquables, qui font exception aux lois communes de la statique des liquides, ne sont dus ni à la pression de l'air, ni à la masse des matières qui composent les corps solides, ni à l'attraction du globe, ou à la pesanteur proprement dite. Ils ne sauraient dépendre que de deux causes : 1° de l'attraction moléculaire de la paroi interne du tube pour le liquide; 2° de l'attraction moléculaire des particules du liquide les unes pour les autres.

La première cause paraît seule déterminer la forme concave ou convexe que prend la surface du liquide, et l'on démontre rigoureusement que le liquide doit s'élever le long des parois solides, lorsque l'attraction de ces parois est plus considérable que la moitié de celle des particules du liquide les unes pour les autres; tandis que le liquide

doit s'abaisser autour des parois solides et représenter une courbe convexe, quand l'attraction des parois solides est moindre que la moitié de celle qui réunit les particules du liquide.

De Laplace a démontré, par une des plus brillantes et des plus ingénieuses applications de l'analyse que nous connaissions, que la forme concave ou convexe du liquide étant déterminée par la cause que nous venons de dire, l'élévation ou l'abaissement en était une conséquence nécessaire et calculable. Il a considéré que la surface ou la couche infiniment mince qui termine un liquide, doit éprouver une pression de la part des molécules placées au dessous d'elle; que, dans la figure concave, la quantité de cette pression venait en diminution du poids de la colonne liquide, et qu'en conséquence celle-ci devait avoir un excès de hauteur pour que l'équilibre subsistât; que, dans la forme convexe, au contraire, cette pression s'ajoutait à celle déjà produite par la colonne des liquides, et que, par conséquent, celle-ci avait besoin d'une moindre hauteur totale pour maintenir l'équilibre.

En appliquant à ces principes des calculs mathématiques d'un ordre très relevé, de Laplace a trouvé que les hauteurs des colonnes dans les tubes capillaires devaient être en raison inverse du rayon de la demi-sphère qui termine le liquide ou du diamètre du tube, et que les hauteurs devaient être moitié moindres entre des lames parallèles, ce qui a été confirmé par des mesures très délicates prises par Haüy.

Ces principes et cette loi générale expliquent un grand nombre de phénomènes remarquables.

1° Si une goutte d'eau est introduite dans un tube étroit de forme conique, et par son bout le plus large, elle se porte rapidement vers son extrémité la plus étroite. On

voit en effet que cette goutte de liquide est terminée dans e tube par deux surfaces concaves, dont l'une a un diamètre plus petit que l'autre, et par conséquent une action plus forte; mais cette action étant négative, la goutte d'eau éprouvera plus de pression du côté de la grande surface, et moins du côté de la petite; elle devra, par conséquent, se mouvoir vers la partie la plus étroite du tube. Le contraire arrive à une goutte de mercure dans la même situation, parce que ses surfaces convexes ont une action positive.

2° Deux lames de verre, formant entre elles un angle aigu, étant plongées verticalement dans l'eau, on voit le liquide s'élever entre elles d'autant plus qu'on s'approche de l'angle, et la courbe qui en résulte est une hyperbole; ce qui se déduit du calcul et se trouve confirmé par l'expérience.

3° Si deux corps flottant sur un liquide produisent tous deux l'élévation ou l'abaissement de ce liquide, à un certain degré de rapprochement, les deux corps se porteront l'un vers l'autre, et contracteront une adhérence. On peut répéter cette expérience avec deux morceaux de liége flottans sur l'eau, ou avec deux aiguilles très fines qui flottent aussi à cause de la couche d'air qui leur est adhérente. Lorsque, des deux corps que l'on rapproche, l'un abaisse le liquide et l'autre l'élève, ces corps se repoussent, et si on les met en contact ils adhèrent. Tous ces faits s'expliquent, puisqu'on démontre, par les principes de de Laplace, que, dans l'élévation ou l'abaissement d'un liquide entre deux lames, les pressions de dehors en dedans doivent toujours être plus considérables que celles qui agissent de dedans en dehors.

L'ascension des liquides dans des tubes capillaires peut être portée très loin : dans un tube d'un millimètre de dia-

mètre l'eau s'élève d'environ trente millimètres au dessus de son niveau, et le mercure s'abaisse d'environ treize millimètres : or, il existe, particulièrement dans les tissus organiques, des canaux infiniment plus déliés, et dans lesquels l'ascension doit être d'autant plus considérable que leur diamètre est plus petit.

Les circonstances naturelles qui présentent des cas de capillarité sont extrêmement nombreuses. Un morceau de sucre en partie plongé dans l'eau s'en pénètre promptement dans toute sa hauteur; une muraille dont le pied est baigné dans l'eau devient humide à une grande élévation; une goutte d'huile s'étend au loin dans le tissu d'une étoffe ou dans une feuille de papier.

L'action capillaire explique parfaitement comment les corps gras, naturellement liquides ou fondus par la chaleur, s'élèvent dans les mèches de coton pour arriver peu à peu dans le centre du foyer de chaleur, s'y distiller, et produire le gaz hydrogène percarboné qui, lui-même, produit la flamme. Elle explique aussi comment un vase, en partie plein d'eau, se vide complètement et goutte à goutte, si l'on place sur le bord une mèche de coton qui plonge dans l'intérieur et descend en dehors plus bas que le fond du vase.

Les effets de la capillarité peuvent expliquer jusqu'à un certain point l'ascension des liquides dans les végétaux vivans. Les canaux dans lesquels ces liquides circulent, sont, sans doute, extrêmement déliés, leurs extrémités inférieures plongent avec les racines dans les liquides du sol, et peuvent ainsi se remplir spontanément jusqu'à une très grande hauteur. Le phénomène devrait s'arrêter au moment où cette élévation compenserait l'action capillaire; mais la transpiration dissipant au fur et à mesure les liquides qui arrivent dans les parties supérieures, ils doi-

vent être sans cesse pompés de nouveau par les bouches absorbantes des racines.

L'économie animale, en elle-même, doit présenter des effets de capillarité d'autant plus marqués, que les vaisseaux qui la composent sont d'une grande ténuité. Il est plus difficile d'en saisir les dispositions; mais on conçoit cependant que les exhalations produites aux surfaces cutanées et pulmonaires peuvent exister et entretenir une action absorbante, qui s'exercerait dans l'intérieur des voies digestives, quand elles contiennent des liquides, ou dans d'autres cavités naturelles, qui en sont habituellement humectées. On peut même ajouter qu'il ne serait pas impossible de trouver, dans cet excès de pression extérieure, que supporte toujours un tuyau capillaire exerçant son action, une explication plus ou moins satisfaisante de cette contractilité insensible qui paraît exister dans le tissu de tous nos organes, et présider à ce qu'il y a de plus intime dans nos fonctions.

Pour éviter toute fausse application de cette théorie de ces phénomènes capillaires à l'économie animale, il est essentiel de ne jamais perdre de vue les propositions suivantes :

1° Un espace quelconque, entièrement plein de liquide, ne saurait exercer aucune action capillaire.

2° Une cavité capillaire dont les parois seraient très flexibles et susceptibles d'un facile rapprochement, ne saurait exercer aucune action capillaire.

3° La nature de la substance qui enduit actuellement la surface interne d'un espace capillaire, détermine son mode d'action sur les liquides, quelle que soit d'ailleurs la nature des parois elles-mêmes; c'est ainsi qu'un tube de verre mouillé dans l'intérieur élève l'eau; que le même

tube enduit de graisse intérieurement abaisse le niveau de l'eau.

DE QUELQUES MOUVEMENS GÉNÉRAUX DES MASSES LIQUIDES.

204. Il est aussi impossible de résoudre d'une manière générale les problèmes relatifs aux mouvemens des liquides, que ceux qui sont relatifs à leur équilibre; nous sommes donc réduits à étudier des cas particuliers.

On observe certains mouvemens qui se passent dans l'intérieur d'une masse d'eau contenue dans un vase, pendant que le liquide s'écoule par une ouverture; ces mouvemens sont différens si la masse de liquide se trouvait en repos avant l'écoulement, ou si cette masse était déjà plus ou moins agitée. Ces phénomènes deviennent sensibles lorsqu'on se sert de vases de verre, et qu'on mêle à l'eau de la résine en poudre.

Lorsque la masse liquide contenue dans le vase était d'abord en repos, on voit ses particules descendre verticalement et se diriger ensuite, par des lignes convergentes, du côté de l'ouverture, qu'elle soit placée au fond de ce vase ou sur un de ses côtés; la surface liquide demeure horizontale pendant que le vase se vide ainsi; mais lorsqu'il n'y a plus que quelques centimètres de liquide, il se forme une dépression au dessus de l'ouverture, et cette dépression devient bientôt un entonnoir très prononcé, comme dans la *fig.* 79. Si le liquide a été légèrement agité avant l'écoulement, l'entonnoir se forme beaucoup plus tôt, et surtout lorsqu'on a imprimé au liquide un mouvement de rotation, ou lorsque le vase a lui-même une forme conique. On conçoit ces différens effets, en considérant que les molécules qui descendent en lignes verticales jusqu'à l'ouverture, doivent être animées d'une plus grande

vitesse que celles qui y arrivent par des directions obliques ; en sorte que le liquide doit manquer au dessus de l'ouverture, tandis qu'il en existe encore sur les parties latérales. Le mouvement circulaire concourt au même effet, en produisant dans les particules liquides une force centrifuge qui les écarte de cette même ligne verticale.

Lorsque l'orifice est latéral, il ne peut pas se former d'entonnoir; mais on observe une dépression du liquide, d'autant plus considérable que l'écoulement est plus rapide.

DE L'ÉCOULEMENT DES LIQUIDES PAR DES ORIFICES.

205. En étudiant les phénomènes de l'écoulement des liquides par des orifices, il est nécessaire de supposer d'abord les ouvertures percées dans des parois très minces, car nous verrons plus tard qu'un canal d'une certaine étendue influe beaucoup sur l'écoulement.

Lorsqu'un liquide s'écoule par une ouverture percée en minces parois, il se forme une colonne à laquelle on donne le nom de *veine fluide;* elle a exactement la forme de l'ouverture, lorsque le liquide contenu dans le vase est en repos; mais si ce liquide tourne ou forme un entonnoir, la veine liquide prend la forme d'une colonne torse, ou même s'écarte pour former un entonnoir opposé. Quelques inégalités dans les bords de l'ouverture peuvent aussi produire cet écartement, comme on peut l'observer à l'ouverture de la plupart des robinets.

Le phénomène le plus remarquable que présente la veine liquide, de quelque forme qu'elle soit, est une sorte de resserrement de cette veine, à une distance de la moitié du diamètre de l'ouverture; on lui donne le nom de *contraction* de la veine fluide : elle est constamment telle, que le

volume de la veine est réduit aux 0,62 de son volume primitif, quel que soit d'ailleurs le diamètre de l'ouverture ou la hauteur du réservoir. Ce rétrécissement est dû à la même cause que nous avons vue (204) produire l'entonnoir intérieur. Les colonnes liquides du centre marchent d'abord plus vite que celle de la circonférence, et, par conséquent, le volume de la veine doit diminuer; mais bientôt le mouvement se partage également entre toutes les parties liquides, et la veine liquide conserverait uniformément son volume réduit, sans l'influence des causes que nous indiquerons bientôt. Cette contraction de la veine liquide est d'une bien grande importance dans l'appréciation des produits de l'écoulement, car elle représente en quelque sorte le véritable diamètre de l'ouverture, et c'est faute d'en avoir tenu compte qu'on ne pouvait réussir autrefois à concilier les résultats de l'expérience avec le calcul.

Si la veine liquide tombe verticalement d'une ouverture percée dans le fond d'un vase, son diamètre diminue rapidement, ce qui provient de ce que la chute du liquide se fait par un mouvement accéléré.

Si la veine liquide s'échappe horizontalement d'une ouverture percée dans une paroi latérale, elle décrit une courbe analogue à celle des projectiles ordinaires, c'est-à dire, à peu près une parabole. Son volume diminue beaucoup moins rapidement que dans le cas précédent.

Si la veine liquide s'échappe, de bas en haut, par une ouverture percée dans une paroi supérieure, elle grossit progressivement au lieu de diminuer, parce que son mouvement est uniformément retardé.

Dans tous les cas, la veine liquide finit par se briser et se disperser, par l'effet de la résistance de l'air qu'elle trouve sur son passage.

VITESSE DE L'ÉCOULEMENT.

206. D'après les principes que nous avons établis (196 et 197) sur les pressions que les liquides exercent sur les parois des vases, il semblerait que la vitesse du liquide qui s'échappe par une ouverture dût être directement proportionnelle à la hauteur du niveau du liquide au dessus de l'ouverture. Cependant il en est tout autrement, parce qu'il y a une grande différence entre une simple pression et un mouvement effectif.

En supposant que les couches superposées du liquide qui remplit le vase demeurent horizontales et descendent parallèlement à elles-mêmes, pendant l'écoulement, on trouve que la vitesse du liquide doit être la même que celle d'un corps solide qui serait tombé en chute libre, du niveau du liquide au niveau de l'ouverture; et comme on sait qu'un corps jouit d'une vitesse finale capable de lui faire parcourir, dans le même temps, un espace double, c'est avec cette vitesse que le liquide doit s'échapper de l'ouverture.

Lorsqu'on ouvre tout à coup une ouverture en minces parois, la vitesse du liquide est d'abord très petite, et le jet n'acquiert toute son amplitude qu'au bout d'un certain temps. Il n'en saurait être autrement, puisque ce mouvement est l'effet d'une force accélératrice qui doit être infiniment petite au premier instant.

Si deux ouvertures sont placées à des hauteurs différentes au dessous du niveau du réservoir, les vitesses des colonnes liquides seront en proportion des racines carrées des hauteurs, puisque les vitesses d'un corps en chute libre seraient dans cette proportion. Ainsi, lorsque la hauteur du niveau au dessus de l'ouverture est quadruple, la vitesse de l'écoulement est seulement double.

Si donc un réservoir avait $4^m,9$ de hauteur, l'eau s'écoulerait d'un orifice inférieur avec une vitesse de $9^m,8$ par seconde; et si l'on cherchait la vitesse de l'écoulement pour un réservoir de 1^m de hauteur, il faudrait faire la proportion $\sqrt{4,9} : \sqrt{1} :: 9^m,8 : x$; d'où l'on tirerait $x = 4^m,42$.

Il est évident que la quantité d'eau qui s'écoule par une ouverture, est représentée par la solidité d'un prisme qui aurait pour base l'ouverture par laquelle se fait l'écoulement, et pour hauteur l'espace parcouru par la veine liquide dans un temps donné, c'est-à-dire la vitesse. Il suffira donc de multiplier la surface de l'ouverture par la vitesse du liquide, pour calculer la quantité du liquide qui coulera dans un temps donné. Si, par exemple, le réservoir avait $4^m,9$ de hauteur, et l'ouverture 4 millimètres carrés, en multipliant 4 millimètres par $9^m,8$, on aurait 39,200 millimètres cubes pour la quantité d'eau écoulée dans une seconde; d'où l'on voit que, sous les mêmes pressions, les quantités d'eau écoulée sont en raison de la surface des orifices; en sorte qu'une ouverture de 2 millimètres de diamètre laisse passer quatre fois plus d'eau qu'une ouverture de 1 millimètre.

Le mouvement qu'une veine liquide pourrait imprimer à d'autres corps est proportionnel à la masse multipliée par la vitese; mais la masse est elle-même proportionnelle à la vitesse; ainsi, la force motrice est comme le carré de la vitesse : mais comme la vitesse est en raison de la racine carrée de la hauteur du réservoir, il en résulte que la force motrice d'une veine liquide est directement et simplement proportionnelle à la hauteur du réservoir.

Tous les faits que nous venons d'établir par le raisonnement sont pleinement confirmés par l'expérience, pourvu que l'on mesure les diamètres des ouvertures, en tenant compte de la contraction de la veine liquide. On peut ré-

péter ces expériences avec un vase d'une médiocre capacité, dans lequel on entretient un niveau constant, par l'arrivée d'un filet continu de liquide, ou par l'ingénieux procédé de M. Prony.

TUYAUX ADDITIONNELS.

207. Nous avons supposé que les ouvertures étaient percées en minces parois, et c'est seulement dans ce cas que les résultats précédens sont vrais. En effet, si l'on adapte à l'ouverture un petit conduit cylindrique du même diamètre et de quelques millimètres de longueur, la dépense du liquide est tout à coup accrue de 10 à 13, et, si le tuyau est évasé, elle peut être plus que doublée. Toutefois, ces phénomènes n'ont lieu que dans le cas où la substance du conduit est susceptible d'être mouillée par le liquide; on doit les attribuer à ce que l'adhérence du liquide avec les parois du tube s'oppose à la contraction de la veine fluide, ou même la dilate.

On conçoit que si le tuyau additionnel était rétréci dans la forme même de la contraction naturelle de la veine liquide, il ne changerait rien à l'écoulement; et c'est ce qui arrive en effet.

Lorsque l'écoulement a lieu par des tuyaux très prolongés, il peut arriver différentes circonstances.

1° Si le tuyau est horizontal, le frottement du liquide dans son intérieur ralentira sa marche, et l'écoulement sera moins considérable; il pourra même arriver, si le tuyau est extrêmement long, que le liquide ne puisse plus y couler ou n'en sorte que goutte à goutte; d'où vient la nécessité d'employer de très gros tuyaux pour transmettre l'eau à de très grandes distances.

2° Si le tuyau va en descendant, le liquide contractera,

en le parcourant, une accélération de vitesse; et comme le cylindre du liquide ne pourra pas diminuer de volume, le liquide inférieur communiquera une partie de sa vitesse au liquide supérieur, et l'écoulement sera accéléré.

3° Si le tuyau va en montant, l'écoulement du liquide sera ralenti, puisque la colonne d'eau contenue dans le tuyau fera équilibre à une partie de la pression du réservoir.

Les parois des tuyaux par lesquels les liquides s'écoulent n'éprouvent aucune pression lorsque ces tuyaux sont horizontaux, et que la vitesse du liquide est la même dans toute leur étendue, comme cela arrive sensiblement dans de gros tuyaux librement ouverts. Si le mouvement du liquide est retardé dans le tuyau, ces parois éprouveront une pression de dedans en dehors; si, au contraire, la vitesse du liquide s'accélère dans le tuyau, ces parois éprouveront une pression de dehors en dedans, ce dont il est facile de s'assurer; car si l'on perce le tuyau dans le premier cas, il en sortira un jet de liquide, dans le second il y rentrera de l'air.

Les canaux librement ouverts à leur partie supérieure, comme les gouttières, les lits des fleuves, etc., ne présentent rien de semblable; le cours des liquides est uniforme quand ils n'ont pas de pente, et il en sort par une extrémité précisément autant qu'il en entre par l'autre.

Lorsqu'ils ont une pente, le mouvement du liquide est accéléré, et par conséquent son volume va en diminuant dans le canal.

Dans tous les cas, si la dimension du canal diminue, la vitesse du liquide augmente, et réciproquement; c'est ce qui fait que les rivières deviennent rapides quand on les resserre dans d'étroites limites; comme on peut le remarquer à Paris, sous une arche du Pont Notre-Dame. On

profite même de cet effet pour obtenir de grandes puissances motrices, en barrant une partie du lit d'un fleuve, et forçant ainsi toute l'eau à passer dans un espace rétréci.

Pour connaître la quantité d'eau qui s'écoule dans un fleuve, il faut mesurer la coupe verticale de la masse d'eau, dans un point quelconque, et multiplier la surface de cette coupe par la vitesse du courant; quant à cette vitesse, on la détermine en suivant, du rivage, un corps flottant placé dans le milieu. Il faut seulement remarquer que le liquide éprouve un frottement sur les parois du canal, en sorte que la vitesse des molécules est diminuée dans les points de contact, et ces molécules retardent à leur tour celles qui les avoisinent. On observe en outre que l'action de l'air retarde aussi la marche du liquide, en sorte que le maximum de la vitesse est dans le milieu du courant, à quelques centimètres de profondeur, et que le terme moyen de la vitesse de la masse est environ les $\frac{4}{5}$ de ce maximum: du reste, le frottement peut retarder la vitesse au point d'élever sensiblement le niveau de l'eau dans le canal.

Le mouvement des liquides, dans des canaux flexibles et élastiques, présente des problèmes très compliqués, qu'il serait intéressant d'étudier, par rapport à leur application au système de la circulation dans les animaux; tout ce que nous savons, c'est que, 1° les canaux courbes ou anguleux tendent à se redresser par le mouvement des liquides qui les parcourent; 2° que les canaux se dilatent quand la pression augmente, et reviennent ensuite sur eux-mêmes quand elle diminue; ce qui tend de deux manières à établir un mouvement uniforme, d'abord en retardant la marche du liquide dans la dilatation, et ensuite en l'accélérant au moment du resserrement. C'est ainsi que se comportent les artères qui reçoivent le sang par les impulsions du cœur.

CHOC SUR LES PAROIS DES CANAUX.

208 Nous ne pouvons pas quitter ce sujet sans dire un mot d'un phénomène très remarquable, qui a fourni une des machines les plus importantes que nous possédions, et qui explique clairement les effets du pouls, qui ont été l'objet de tant de discussions.

S'il arrive qu'un liquide s'écoule d'un réservoir A (*fig.* 80), par un tuyau AB, et sorte par le robinet B, plus étroit que le tuyau, et que l'on vienne à fermer tout à coup le robinet, l'intérieur du tuyau éprouvera un choc violent, qui, dans quelques circonstances, peut aller jusqu'à briser les tuyaux, comme nous avons eu occasion de l'observer. On obtient, en quelque sorte, une mesure de ce choc en disposant un tuyau vertical CD, dans lequel l'eau se tient au même niveau que dans le réservoir. On verra, en effet, au moment de la fermeture du robinet, le liquide s'élever tout à coup dans le tube bien au dessus de son niveau.

On concevra ces effets en considérant que la colonne liquide contenue dans le canal AB, est animée, pendant l'écoulement, d'une certaine quantité de mouvement, qui la ferait sortir du tuyau si on le fermait près du réservoir, et qui doit la comprimer lorsqu'on le ferme subitement à son extrémité.

Le belier hydraulique, dont la *fig.* 81 donne une idée, est une ingénieuse invention de Mongolfier, fondée sur ce principe.

AB est un canal fermé dans lequel l'eau coule par sa pente naturelle, en s'échappant par l'ouverture C; au dessous de cette ouverture est placé un boulet creux, dont le poids est calculé de manière que, lorsque le courant

d'eau prend une certaine rapidité, le boulet est enlevé et ferme subitement l'ouverture C, dans ce moment, le liquide arrêté soulève l'autre boulet F, et une certaine quantité d'eau passe dans le réservoir d'air E; alors le liquide arrêté permet au boulet D de retomber; le mouvement du liquide se rétablit, s'accélère, et l'opération recommence. Le réservoir d'air se remplit donc d'eau qui comprime l'air; mais le bas de ce réservoir est muni d'un tuyau ascendant G, par lequel l'eau pressée par l'air comprimé s'élève à des hauteurs relatives à la force de la machine.

Le phénomène que l'on connaît sous le nom de *pouls*, ou de battement des artères dans les animaux, est précisément du même ordre que celui dont nous venons de parler, quoique sa production dépende d'une cause inverse. En effet, toutes les artères d'un animal présentent un choc manifeste au moment où le ventricule gauche se contracte. Ce choc devient sensible lorsqu'on pose le doigt sur une artère appuyée d'ailleurs sur un corps résistant. Il paraît que, dans ce choc, l'artère n'éprouve ni dilatation, ni déplacement. Il est évident qu'à l'instant de la contraction du ventricule gauche, toutes les colonnes de sang qui communiquent avec celle de l'aorte sont subitement frappées d'une impulsion à laquelle elles ne peuvent cependant pas obéir immédiatement; en sorte que cette impulsion produit plutôt une secousse qu'un déplacement dans les colonnes de sang. Néanmoins, la masse de sang poussée par le ventricule pénètre dans les gros troncs artériels à la faveur de leur dilatation momentanée; mais bientôt ces canaux reviennent sur eux-mêmes, et poussent en effet le sang, par un mouvement successif, jusque dans les plus petites ramifications.

On peut dire, en résumé, que c'est la contraction du

cœur qui produit le battement du pouls; que c'est la contraction du cœur qui envoie le sang dans les grosses artères; et que c'est le retour élastique des grosses artères sur elles mêmes qui chasse le sang dans les plus petits vaisseaux.

DES EAUX JAILLISSANTES.

209. Nous avons vu qu'un liquide s'écoulait par une ouverture percée en minces parois, avec une vitesse égale à celle d'un corps grave qui serait tombé en chute libre du niveau du réservoir à celui de l'ouverture. Il s'ensuivrait en apparence, qu'en adaptant au fond du réservoir un tuyau recourbé, de manière que l'orifice se trouvât tourné en haut, le liquide, jaillissant par cette ouverture, dût s'élever précisément à la hauteur du niveau du réservoir. Il n'en est cependant point ainsi dans la pratique; et plusieurs causes concourent à diminuer la hauteur d'un jet d'eau alimenté par un réservoir déterminé : 1° les frottemens dans les tuyaux de conduite et dans l'ajustage même qui donne issue au liquide; 2° la résistance de l'air que le liquide rencontre dans son chemin; 3° la chute des particules de liquide qui, étant arrivés au sommet du jet, commencent à redescendre, et retombent sur celles qui tendent à s'élever. La somme de ces résistances à l'élévation du jet est variable suivant différentes circonstances. Elle devient, en général, d'autant plus considérable que la vitesse est plus grande, ou que l'on se propose de produire des jets plus élevés. Il résulte, des recherches de Mariotte, que pour produire un jet d'eau de 5 pieds, il suffit de donner au réservoir 5 pieds plus 1 pouce d'élévation; tandis que, pour obtenir un jet d'eau de 100 pieds, il faut employer un réservoir de 100 pieds plus 400 pouces, c'est-

à-dire que la différence est seulement de $\frac{1}{60}$ dans le premier cas, et qu'elle est de près d'un tiers dans le second. On concevra cette grande différence, si l'on considère que les frottemens paraissent croître comme le carré des vitesses, et qu'il en est de même de la résistance de l'air.

On peut diminuer, par différens moyens, les obstacles à l'élévation du jet. On réduit le frottement en employant des tuyaux de conduite très larges relativement à l'ouverture, et en pratiquant cette ouverture en mince paroi; et l'on prévient la résistance du liquide qui retombe, en inclinant légèrement la direction du jet.

Il existe d'ingénieux artifices au moyen desquels on peut élever les eaux jaillissantes, et même les liquides contenus dans les tubes communiquans, bien au dessus du niveau de leur réservoir. Il suffit pour cela d'introduire dans l'ajustage du jet d'eau, ou dans la colonne ascendante que l'on veut élever, un courant d'air qui se mêle au liquide, divise en quelque sorte la colonne en différentes tranches séparées par des bulles d'air, de façon qu'une telle colonne doit être beaucoup plus haute qu'une colonne d'eau pure à laquelle elle peut faire équilibre.

Lorsqu'on introduit de l'air dans l'ajustage d'un jet d'eau, il se produit un bruit extraordinaire, qui a de l'analogie avec les sons de l'harmonica.

Manoury a fondé sur le principe du mélange de l'air avec l'eau l'invention d'un grand nombre de machines, qui ont pour objet d'élever l'eau au dessus de son niveau primitif, sans faire usage d'aucun moteur étranger, et qui deviendront sans doute d'une heureuse application dans l'art très important des irrigations.

DU CHOC ET DE LA RÉSISTANCE DES LIQUIDES.

210. Nous avons vu (148 et suiv.) que le mouvement pouvait se transmettre d'un corps solide à un autre par le choc; que ce mode de transmission était soumis à des lois particulières et modifié par les circonstances de la dureté absolue, de la mollesse ou de l'élasticité des corps solides. Le choc des corps liquides est infiniment plus difficile à apprécier dans ses effets, attendu la mobilité des différentes particules qui les composent. Il est même presque impossible de calculer les effets du choc réciproque de deux liquides, et à peine peut-on découvrir quelques unes des lois de la transmission du mouvement dans le choc d'un liquide et d'un solide.

La première question qui se présente serait de distinguer les effets de la transmission du mouvement lorsque le liquide vient frapper le solide, ou lorsque, au contraire, le corps solide est en mouvement dans un liquide en repos. On a jusqu'ici confondu ces deux circonstances, en supposant une parfaite similitude dans les effets. Il paraît cependant que cette similitude n'est pas complète, et que l'hydrodynamique a beaucoup à faire sous ce point de vue.

Pour étudier le choc entre les liquides et les solides, nous sommes obligés, comme dans tous les cas précédens, de particulariser beaucoup les faits à étudier, et c'est ainsi que nous supposerons une masse liquide en mouvement dans un canal indéfini, et un corps solide immergé dans ce liquide, en recevant l'impulsion, et tendant à se mouvoir dans le même sens; admettant que l'effort serait le même si le liquide était en repos, et le corps solide en mouvement.

Pour arriver à quelque solution théorique et générale

du mouvement transmis dans la circonstance indiquée, on a supposé que toutes les molécules liquides venaient frapper tour à tour l'obstacle solide, lui transmettaient tout leur mouvement direct, et s'échappaient ensuite latéralement, sans exercer désormais aucune autre influence. Ces suppositions sont loin d'être vraies, puisque les particules liquides ne sauraient être transportées transversalement que par une puissance quelconque, et qu'elles doivent aller ensuite transmettre au reste du liquide cette quantité de mouvement qui change nécessairement sa condition dynamique primitive.

On a trouvé, par les abstractions dont nous venons de parler, que les effets du choc ou de la résistance d'un liquide étaient proportionnels, 1° à la densité du liquide; 2° au carré de sa vitesse; 3° à l'étendue de la surface choquée; 4° au carré du sinus de l'angle que la direction de la surface choquée fait avec celle du courant.

On a encore établi, comme principe, que l'effet du choc d'un courant sur un plan perpendiculaire était égal à la pression qu'exercerait un prisme de liquide qui aurait pour base la surface du plan, et pour hauteur le double de celle qui produirait, dans un corps grave, une vitesse égale à la vitesse qui anime le courant.

L'expérience confirme quelques uns de ces résultats, mais ne s'accorde pas avec les autres.

Si l'on fait osciller successivement un pendule dans l'air, dans l'eau et dans le mercure, on trouvera que son mouvement se perpétuera 13 fois plus long-temps dans l'eau que dans le mercure, et 890 fois plus long-temps dans l'air que dans l'eau; ce qui indique qu'en effet la résistance du liquide est proportionnelle à la densité.

Si l'on essaie de maintenir en place une surface carrée opposée perpendiculairement à un courant d'eau, on trouve

que l'action du courant est sensiblement proportionnelle à l'étendue de la surface du plan : on trouve aussi que l'action du courant est à peu près proportionnelle au carré de sa vitesse, pourvu qu'elle ne soit pas très considérable. Mais on observe que si le canal où le courant est établi n'est pas très grand relativement à la surface choquée, l'action du courant s'accroît plus rapidement que la proportion du carré de la vitesse, en sorte que, si le canal était fort étroit, l'action du courant serait considérablement accrue par cette seule circonstance. On observe en effet que, dans ce cas, le liquide s'élève au devant de l'obstacle, et s'abaisse derrière lui, ce qui augmente la pression dans un sens et la diminue dans l'autre, le tout en faveur de l'action impulsive ou de la résistance du courant. On a conclu de cette donnée expérimentale, la nécessité de donner aux canaux de navigation une largeur et une profondeur plus considérables que ne semblerait l'exiger la condition de contenir et de porter des bateaux.

En essayant l'action des courans sur deux plans angulaires dont on puisse varier à volonté l'inclinaison, on a trouvé que la résistance diminuait, en effet, à mesure que les angles devenaient plus aigus, à peu près dans la raison du carré de leurs sinus, dans la limite de 90° à 50°; mais que cette loi ne se maintenait pas lorsque les angles devenaient plus aigus. On a trouvé, par exemple, que sous un angle de 12°, la résistance donnée par le calcul, dans la loi supposée, étant 109, la résistance observée serait 3999; d'où il faut conclure que, dans la construction des bateaux qui doivent marcher contre le courant d'une rivière, il est avantageux de les terminer par des surfaces obliques, ou de leur faire présenter la forme d'un coin; mais qu'il n'y aurait aucun avantage à rendre ce coin extrêmement aigu. C'est d'après le même principe que l'on arme les piles des

ponts d'un éperon angulaire. On termine aussi quelquefois ces piles par les demi-cylindres dont la forme est susceptible de plus de solidité, mais qui réduit seulement aux deux tiers les effets du choc du courant.

Si l'on cherche par expérience quelle est la somme réelle et totale de l'action d'un courant sur un plan quelconque, on trouve qu'elle est à peu près égale à la pression qu'exercerait un prisme liquide qui aurait pour base la surface du plan et pour hauteur l'élévation de laquelle il faudrait laisser tomber un corps grave pour qu'il ait acquis la vitesse même du courant. On voit que ce résultat de l'expérience est précisément la moitié de la pression donnée par le calcul, ce qui prouve évidemment que la théorie du choc des liquides est tout à fait fausse, et qu'elle doit être reprise d'un bout à l'autre, et fondée sur d'autres élémens que ceux que nous avons indiqués.

211. *Mouvement réfracté.* Lorsqu'un corps solide, spécifiquement plus lourd qu'un liquide, est abandonné en chute libre dans l'intérieur de ce liquide, son mouvement doit d'abord s'accélérer; mais, comme la résistance du liquide s'accroît en raison du carré de la vitesse, le mouvement du corps solide doit bientôt devenir uniforme.

Lorsqu'un corps solide est lancé perpendiculairement à la surface d'un liquide, il pénètre dans son intérieur sans que sa direction en soit altérée, il éprouve seulement le retardement qui dépend de la résistance du liquide. Mais si le corps est lancé obliquement à la surface du liquide, comme dans la *fig.* 82, sa direction est changée au point de contact; elle éprouve une *réfraction* qui l'éloigne de la perpendiculaire en raison directe du sinus de l'angle d'incidence, en sorte que le corps, arrivant par la direction AB, au lieu de frapper le fond du liquide dans le point C, irait le frapper dans le point D.

Si l'obliquité de l'incidence est telle que l'angle qu'elle fait avec la surface soit plus petit que l'angle de réfraction, dans la direction A′B, par exemple, le corps ne pénétrera pas l'intérieur du liquide, il sera réfléchi à la surface comme s'il avait frappé un corps solide, et se portera dans la direction B D′. C'est ce qui arrive aux pierres lancées obliquement à la surface de l'eau, et qui forme des ricochets. On produit le même effet en mer, en tirant des boulets très obliquement à la surface de l'eau.

Lorsqu'on a pour but d'atteindre d'un coup de fusil un objet placé dans la profondeur de l'eau, il est nécessaire de tenir compte de la réfraction de la balle, et par conséquent de tirer beaucoup plus bas.

DE L'OSCILLATION DES LIQUIDES.

212. Le cas le plus simple des oscillations d'un liquide est celui d'un siphon renversé, dont ce liquide remplit les deux branches au même niveau. Si, dans cet état, on élève, par un moyen quelconque, par exemple par la succion, l'une des deux colonnes de liquide, l'autre s'abaissera d'une quantité égale, et si on les abandonne subitement à elles-mêmes, elles présenteront des oscillations décroissantes, jusqu'à ce que le niveau soit rétabli. Ces mouvemens ne seront pas de longue durée, parce que les frottemens du liquide dans le tube sont très considérables; mais tant que les oscillations continueront, on pourra remarquer qu'elles seront isochrones; et l'on démontre en outre, par le calcul et par l'expérience, que, dans les cas où les deux colonnes sont verticales, la durée des oscillations est la même que pour un pendule simple dont la longueur serait la moitié de la longueur totale de la colonne liquide.

Si les branches du siphon ne sont pas parallèles, la

longueur réelle des colonnes liquides doit être réduite à leur élévation verticale.

Les agitations des grandes masses liquides dans lesquelles les différens points de leur surface s'élèvent et s'abaissent successivement, ce qui constitue les vagues, sont soumises à des lois analogues. On observe qu'une vague s'élève dans le temps du battement d'un pendule qui serait égal à sa largeur, en sorte qu'une vague de $0^{m},993$ de longueur s'élève une fois par seconde.

Il existe un autre ordre d'agitation des liquides, qui est connu sous le nom d'*ondulations*, et qui est devenu, par la savante analyse de M. Poisson, un des points les plus intéressans et les mieux connus des mouvemens des liquides.

Si on laisse tomber un petit corps pesant dans un point de la surface unie d'un liquide, on voit se former immédiatement des cercles concentriques, qui s'élargissent rapidement pendant que d'autres leur succèdent, et s'étendent à une grande distance. Ces cercles sont formés par une petite vague qui présente un sommet et un enfoncement. L'écartement de ces cercles est d'autant plus grand qu'on les considère plus loin du centre. L'élévation de l'onde va, au contraire, en diminuant très rapidement. Ces mouvemens sont soumis à des lois que M. Poisson a très habilement déterminées, et qui varient suivant la nature de l'ébranlement. Par exemple, si celui-ci a eu lieu par le soulèvement d'un corps précédemment plongé dans l'eau, il se forme à la fois deux espèces d'ondes, dont les unes s'éteignent beaucoup plus vite que les autres.

Des ondes qui s'entrecroisent en partant de différens centres, ne sont nullement dérangées dans leur marche les unes par les autres, comme on peut s'en assurer en jetant

simultanément deux petites pierres sur deux points différens d'une surface liquide.

Les ondes se propagent beaucoup plus loin dans un canal limité que dans une surface indéfinie.

Une onde qui rencontre un obstacle se réfléchit sur lui, et se propage en sens contraire, comme autour d'un centre d'ébranlement. Au delà de cet obstacle les ondes reprennent leur figure et leur marche, comme si l'obstacle n'existait pas.

Lorsqu'une surface liquide limitée communique par une ouverture étroite avec une autre surface, les ondes se propagent par cette ouverture en formant des portions de cercle qui ont cette ouverture pour centre.

DE LA VIBRATION DES LIQUIDES.

213. La réalité de la vibration des liquides est démontrée par la faculté dont ils jouissent de transmettre les sons; mais on conçoit que la mobilité de leurs particules s'oppose à ce qu'on puisse les faire vibrer par les moyens ordinaires, et surtout à ce qu'ils produisent des sons par eux-mêmes : ils ne peuvent donc vibrer que par communication d'un corps agité de ce genre de mouvement. En effet, si l'on dépose dans un verre une certaine quantité d'eau, et qu'on mette ce verre en vibration par un moyen quelconque, la surface du liquide se couvre de rides, qui présentent des figures en rapport avec les nœuds de vibration du verre. Si l'expérience se fait avec de l'eau abaissée un peu au dessous de zéro-température, il se forme aussitôt des cristaux précisément vis à vis ces nœuds de vibration.

Si l'on agite une sonnette dans l'eau après s'y être plongé soi-même tout entier, on en perçoit le bruit avec une énergie infiniment plus considérable que dans l'air. Et c'est

ici le cas de remarquer que la partie essentielle de l'organe de l'ouïe présente un exemple frappant de cette faculté des liquides pour transmettre les sons, puisque les cavités de l'oreille interne dans lesquelles parviennent les dernières extrémités de la portion molle de la septième paire, sont entièrement remplies d'un liquide dont l'évacuation ou l'absence produit une surdité irremédiable.

La vitesse avec laquelle les liquides transmettent le son paraît extrêmement considérable; mais nous n'avons jusqu'ici sur ce point aucune donnée positive.

DE L'ENDOSMOSE ET DE L'EXOSMOSE.

214. M. Dutrochet a découvert un fait nouveau trop important pour ne pas entrer désormais comme partie essentielle dans un traité de physique, quoique, à la vérité, on n'en ait trouvé jusqu'à présent aucune théorie raisonnable, et qu'on ne puisse le rattacher à aucun principe général. Nous exposerons d'abord le fait dans sa plus grande simplicité, nous indiquerons ensuite ses modifications principales et les explications qu'on a tenté d'en donner; enfin, nous dirons un mot des ingénieuses applications de M. Dutrochet, à la physiologie végétale, aussi bien que de celles qu'on peut en faire à la physiologie animale.

Si l'on prend un tube de verre, que l'on ferme son extrémité inférieure par une membrane organique, telle qu'une peau de vessie; si l'on verse dans l'intérieur du tube une certaine quantité d'une solution de gomme ou de sucre dans l'eau, et si l'on plonge l'extrémité du tube fermé par la membrane dans l'eau pure, on observera, 1° que malgré l'excès de pression de la colonne de liquide contenu dans le tube, l'eau pure s'introduira continuellement à travers la membrane, dans l'intérieur de ce tube, élevant ainsi la

colonne de liquide qu'il contient jusqu'à plusieurs pieds de hauteur, et pour ainsi dire sans limite.

2° Qu'une certaine quantité du liquide gommeux ou sirupeux, descendra de son côté à travers la membrane, pour se mêler à l'eau pure.

C'est le premier de ces phénomènes que M. Dutrochet nomme *endosmose;* il donne au second le nom d'*exosmose.*

La membrane organique ne produit l'endosmose que jusqu'au moment où elle commence à se putréfier. A cette époque, le phénomène cesse, et le liquide qui s'était élevé commence à redescendre, en passant, par l'effet de la pression, à travers les porosités de la membrane.

Les membranes organiques ne sont pas les seuls corps qui puissent produire ces phénomènes. Des lames d'ardoise, et mieux encore d'argile cuite, produisent des effets plus faibles mais analogues; les minéraux calcaires ou siliceux n'ont paru à M. Dutrochet produire aucune élévation du liquide dans le tube, la trop difficile ou la trop facile perméabilité s'opposant également au phénomène; la première, en ne laissant pas pénétrer assez de liquide; la seconde, en produisant une déperdition de bas en haut, qui peut compenser l'endosmose.

La nature des liquides influe considérablement sur le phénomène; il est d'autant plus prononcé que la densité du liquide intérieur surpasse davantage la densité du fluide extérieur; il paraît même, dans son intensité, directement proportionnel à cette différence : néanmoins, un liquide moins dense que l'eau, par exemple l'alcool, placé dans l'intérieur du tube, produit l'endosmose sur l'eau placée à l'extérieur; il paraît que l'affinité chimique de l'eau et de l'alcool est une des conditions du phénomène. Des solutions salines produisent des effets d'endosmose très énergiques, mais peu durables, à travers une membrane organique. Ces

solutions paraissent agir sur la membrane, et détruire en elle une propriété nécessaire à ce genre d'effet.

Ce qu'il y a de plus remarquable dans des phénomènes déjà si curieux par eux-mêmes, c'est que la présence de la plus petite quantité d'acide sulfurique ou d'hydrogène sulfuré suffit pour arrêter subitement l'endosmose dans les liquides qui sont le plus aptes à la produire, tandis que les autres acides, hydrochlorique, nitrique, etc., les favorisent beaucoup.

Tous les liquides animaux produisent l'endosmose avec énergie par rapport à l'eau, à l'exception des liquides contenus dans les gros intestins, qui ont une odeur stercorale et qui contiennent de l'hydrogène sulfuré.

L'hydrogène sulfuré est tellement contraire au phénomène d'endosmose, qu'une membrane qui en a été le moins du monde imprégnée, perd la faculté d'agir sur des liquides très propres au phénomène, jusqu'à ce qu'elle ait été immergée et lavée à plusieurs reprises pour la débarrasser de toute trace d'hydrogène sulfuré.

M. Dutrochet conclut avec raison, des faits que nous venons de citer, et d'un grand nombre d'autres, que l'endosmose dépend de l'action combinée des corps poreux et des liquides.

La vitesse avec laquelle un liquide peut pénétrer, en vertu de l'endosmose, de l'extérieur à l'intérieur d'un tube fermé par une membrane, est sans doute assez peu considérable; par exemple, si l'extrémité inférieure du tube est évasée, que la surface de la membrane ait un pouce et demi de diamètre, si le tube lui-même a $0^{m},002$ de diamètre, s'il est appliqué sur une échelle divisée en dixième de pouce, on obtient avec une solution de sucre, dont la densité est 1,145, une ascension de liquide de 53 degrés en une heure et demie.

Ce qu'il y a de remarquable dans la vitesse de l'endosmose, c'est qu'elle paraît être directement proportionnelle aux différences de densité des liquides intérieurs par rapport à l'eau. M. Dutrochet l'a du moins constaté pour des solutions de sucre.

M. Dutrochet a recherché quelle pouvait être l'intensité de la puissance avec laquelle le liquide extérieur pénétrait dans son instrument qu'il appelle *endosmomètre.* Il s'est servi pour cela d'un appareil semblable à celui dont M. Mirbel a fait usage pour mesurer la force ascensionnelle de la sève, et dans lequel cette force est exprimée par la hauteur d'une colonne de mercure que le liquide peut soulever.

M. Dutrochet a reconnu, 1° que la force de l'endosmose était directement proportionnelle aux excès de densité des liquides intérieurs par rapport à l'eau aussi bien que la vitesse; 2° que son intensité pouvait aller jusqu'à soulever 127 pouces de mercure, ou le poids de quatre atmosphères et demie.

On a cherché à rendre raison des phénomènes que nous venons d'exposer. M. Poisson pense que le fluide le moins dense pénètre les canaux capillaires de la membrane, et qu'alors le filet capillaire est attiré en bas par l'action de l'eau pure, en haut par l'action d'un liquide plus dense, et qu'ainsi le surcroît de l'attraction moléculaire supérieure détermine le mouvement ascensionnel; mais, 1° l'alcool, qui est moins dense que l'eau, produit l'endosmose; 2° un atome d'hydrogène sulfuré ou un peu d'acide sulfurique détruisent instantanément l'endosmose; 3° les pierres calcaires ou siliceuses essayées dans toutes les nuances de porosité ne sauraient la produire, tandis que l'argile et les membranes organiques la produisent avec énergie. L'explication de M. Poisson n'est donc pas admissible.

On a supposé que l'état électrique réciproque des deux liquides pouvait être la cause de l'endosmose ; et en effet, nous verrons au livre de l'*Électricité*, qu'un courant galvanique détermine une ascension très rapide du liquide dans le tube, quoiqu'on emploie la même liqueur à l'intérieur et à l'extérieur ; mais la suspension du phénomène par la présence de l'hydrogène sulfuré ou de l'acide sulfurique, pendant que les autres acides le favorisent, n'en demeure pas moins sans aucune explication plausible.

M. Dutrochet s'est servi fort ingénieusement des phénomènes d'endosmose et d'exosmose, pour expliquer ce que l'on a nommé l'irritabilité végétale, c'est-à-dire la propriété que possèdent certaines plantes ou certains organes de plantes, d'exécuter des mouvemens sensibles sous des influences quelconques.

Il admet que des vésicules qui vont constamment en augmentant ou en diminuant de volume, d'une partie du végétal vers l'autre, se gonflent par endosmose ou se vident par exosmose, et modifient ainsi les dimensions des parties végétales flexibles, les meuvent, les agitent, les contournent, ainsi qu'on peut l'observer. Il a rassemblé avec beaucoup de perspicacité tous les faits et toutes les circonstances qui peuvent militer en faveur de cette explication, il a même été jusqu'à rendre compte, par ce moyen, de la tendance des racines vers le centre de la terre, et de la tendance des tiges dans la direction opposée, que l'on avait été tenté d'attribuer à une sorte de polarisation qui se serait établie au collet de la racine, ou dans ce point que M. de Candole a nommé mésophite.

Les phénomènes d'endosmose et d'exosmose sont dignes, sans contredit, de fixer l'attention du physicien physiologiste ; ils paraissent très propres à donner l'explication de beaucoup de phénomènes d'exhalation et d'absorption qui

se produisent dans l'économie animale; mais il est indispensable que les faits soient plus multipliés, et que les expériences aient été répétées et modifiées plus souvent, avant de risquer aucune application directe.

Il serait surtout très curieux de constater si un vaisseau isolé d'un animal, vaisseau dans lequel le sang continuerait à circuler librement, exercerait l'endosmose sur un liquide moins dense que le sang, et au milieu duquel il serait plongé.

APPLICATION DE L'HYDROSTATIQUE A L'ÉCONOMIE ANIMALE.

215. Quoi qu'en aient dit les physiologistes exclusivement vitalistes, et malgré les erreurs grossières qui ont été commises par les physiciens, il n'en est pas moins certain que les lois de l'hydrostatique et de l'hydrodynamique présentent des applications d'un très grand intérêt à la théorie du mouvement des fluides dans les êtres organisés.

Ces applications sont surtout remarquables pour les animaux à sang rouge et chaud, dont le cœur a deux ventricules, et pour l'homme en particulier.

Sans entrer dans le détail de la théorie complète de l'équilibre et du mouvement des fluides animaux, théorie qui forme une branche essentielle de la physiologie positive, nous nous contenterons de traiter un certain nombre des points les plus intéressans, afin d'établir les principes et la méthode qui doivent présider à ce genre d'application. Les nombreux détails omis seront facilement suppléés par les anatomistes et les physiologistes.

Nous nous occuperons successivement, 1° de la force et de l'action du cœur sur les fluides qu'il met en mouvement; 2° de la tension des liquides dans les voies circulatoires; 3° du mouvement réel des liquides dans les vais-

seaux; 4° de la capillarité et de l'endosmose considérées comme moyen d'expliquer l'absorption et l'exhalation.

De la Force et de l'Action du Cœur sur les fluides qu'il met en mouvement.

216. Le cœur de l'homme avec ses quatre cavités et les valvules qui se trouvent à leurs ouvertures, joue trop évidemment le rôle d'une double pompe, pour qu'il soit nécessaire d'entrer aujourd'hui dans aucune explication à cet égard ; mais il est fort important d'établir la réalité d'une véritable aspiration, dont jusqu'ici on a tenu trop peu de compte.

Les ventricules et les oreillettes présentent une très grande différence de structure. Le tissu des oreillettes, quoique contractile, est mince et flexible, ses cavités n'ont de consistance que dans le moment de la contraction ; le tissu des ventricules, au contraire, est épais, résistant, élastique, il a beaucoup de consistance, même dans l'état de non contraction de ses fibres.

Il résulte de cette considération qu'un ventricule non contracté a une forme, une étendue, une capacité qui lui sont propres, et qu'il tend à conserver ou à reprendre quand il les a perdues par une cause quelconque, avec une puissance du genre de l'élasticité, et telle, par exemple, que celle d'une poire de gomme élastique, qui tend à se dilater lorsqu'elle a été comprimée avec la main, et qui exerce une puissante aspiration sur un liquide dans lequel on a plongé son ouverture.

Cette élasticité toute physique du tissu du cœur est combattue par la puissance de contraction qui raccourcit et rapproche les fibres, en diminuant le volume et la capacité du ventricule ; mais aussitôt que la contraction cesse,

l'élasticité reprend son empire, le ventricule reprend sa capacité et présente conséquemment une dilatation *puissante* et *active*, quoique non *contractile*, circonstance qui rend compte des nombreuses controverses établies sur cette question, en en donnant la solution la plus naturelle.

D'après ce que nous venons de dire, il est évident que non seulement le cœur agit comme une pompe foulante pour projeter le sang dans les vaisseaux, mais encore que les ventricules exercent une *aspiration* véritable et puissante, sur le fluide qui peut être contenu dans les oreillettes.

La condition que nous venons d'indiquer étant introduite dans les problèmes compliqués de la circulation du fœtus, de la théorie des anévrysmes, etc., en rendra la solution beaucoup plus facile et plus complète.

L'intensité de la force avec laquelle un des ventricules du cœur, le gauche par exemple, presse le sang contenu dans sa cavité pour le pousser dans les vaisseaux, présente une question qui a de tout temps piqué la curiosité des physiologistes, et qui a été résolue d'une manière bien variée, puisque les uns ont attribué au ventricule gauche une force de plusieurs milliers de livres, tandis que d'autres l'ont réduite à quelques onces.

L'auteur d'une thèse moderne a très bien senti que le seul moyen d'apprécier cette puissance, était de mesurer la colonne de mercure qui pourrait être soutenue par l'impulsion du liquide émanant du cœur; mais il a commis l'erreur grave de multiplier cette hauteur de colonne par l'*aire* ou la surface de l'ouverture de l'artère aorte, pour obtenir une évaluation de la puissance contractile du ventricule. Nous allons établir les principes, on en déduira facilement les conséquences,

Lorsqu'un liquide remplit une cavité, fermée de toutes

parts, mais communiquant avec un tube ascendant et également rempli de liquide jusqu'à une certaine hauteur, si l'on veut connaître la pression exercée par le liquide sur l'intérieur du vase, il faudra multiplier *l'étendue* de la surface par la hauteur de la colonne. Si, la hauteur restant la même, la surface interne diminue, la pression deviendra moindre, et réciproquement; du reste, la largeur de l'ouverture par laquelle le vase communique avec le tube, n'apportera aucune modification à la pression.

Si nous supposons maintenant que le vase ait des parois contractiles, et que la contraction même soit la cause de l'élévation du liquide dans le tube, il devient évident que la contraction sera exactement égale à la pression qu'elle produit et supporte; et en conséquence, pour obtenir la valeur de la puissance de contraction du ventricule gauche, il faudrait multiplier l'étendue de sa surface interne par la hauteur de la colonne de liquide soutenue pendant la contraction.

Il est évident que l'étendue de l'ouverture de l'aorte ne saurait entrer pour rien dans cette évaluation, hors le cas où cette ouverture serait devenue tellement étroite qu'elle s'opposerait à la libre émission du fluide.

Il est sans doute à peu près impossible de mesurer la surface interne du ventricule gauche. Un moule intérieur de cette capacité ne donnerait pas même un résultat satisfaisant, attendu la présence des colonnes charnues qui traversent partiellement la capacité et dont la surface ne doit pas entrer en compte.

Malgré l'impossibilité de déterminer avec exactitude l'intensité de la force du ventricule gauche, il n'en est pas moins très intéressant de connaître la loi que nous venons d'exposer, et dont les conséquences sont plus fécondes qu'on ne le penserait au premier abord.

La première conclusion qui se présente, c'est que, toutes choses égales d'ailleurs, le ventricule gauche du cœur a d'autant plus de force pour projeter le sang, que sa capacité interne est plus petite, et réciproquement; en sorte qu'on peut dire que la force du cœur est inversement proportionnelle au carré de ses dimensions, résultat qui semblerait paradoxal en l'absence des principes établis précédemment.

La même loi exige impérieusement l'hypertrophie du cœur dans l'anévrysme, sous peine d'affaiblissement dans l'émission du sang.

Cette loi nous porte encore à distinguer soigneusement le volume du sang envoyé par le cœur à chaque contraction, de la force et de la puissance avec laquelle cette projection est produite. Ainsi un cœur volumineux pourra projeter le sang avec moins de force, mais il en recevra et en émettra un plus grand volume à chaque contraction, et la masse totale de ce liquide parcourra l'organisation un plus grand nombre de fois dans un temps donné. On peut remarquer en général qu'une impulsion énergique imprimée à un petit volume de sang, présente les conditions les plus favorables à l'état régulier des fonctions.

De la Tension des liquides dans les voies circulatoires.

217. Le cœur et les artères qui prennent leur origine de l'aorte constituent un ensemble de cavités et de canaux qui se trouvent, par les contractions successives du cœur, dans un état de tension continuelle et très variable. Cette tension dépend, 1° de la force de contraction du ventricule; 2° de la résistance au passage du liquide dans les extrémités des artères, qui ne leur permet pas de se vider aussi vite qu'elles reçoivent le sang du cœur, à moins que tout le système

n'ait acquis une tension suffisante ; 3° d'une force de réaction très prononcée dans les artères, et en vertu de laquelle elles se resserrent et tendent à se vider du sang qu'elles contiennent.

La tension du système artériel doit être considérée indépendamment de la vitesse du liquide qui le parcourt, car ces deux choses n'ont presque rien de commun. En effet, si la force du cœur est accrue et ses contractions plus rapides, mais que les extrémités artérielles livrent une issue facile au sang, la tension du système ne s'accroîtra pas quoique la circulation soit plus rapide ; et, d'une autre part, si les extrémités artérielles font plus d'obstacle à l'issue du sang que de coutume, la tension du système pourra s'accroître beaucoup sans que les impulsions du cœur soient augmentées, et la vitesse de la circulation sera effectivement ralentie.

Il faut remarquer que la tension actuelle du système artériel est un puissant obstacle mécanique au passage du sang, du cœur dans les artères, et que, par conséquent, le volume du sang transmis à chaque contraction sera d'autant moindre que la tension artérielle sera plus grande.

Il paraît évident que la tension du système artériel est une des choses qui influent le plus sur ce qu'on nomme l'état du pouls ; il est donc bien essentiel de distinguer soigneusement cette tension de la plus ou moins grande vitesse circulatoire.

La tension des artères paraît être exactement semblable dans tous les points de l'économie, c'est ce que nous avons constaté, il y a plus de vingt ans, par des expériences sur la hauteur d'une colonne de mercure que cette tension peut supporter, et ce qui résulte des expériences publiées par l'auteur de la thèse déjà citée. On aurait pu déduire ce fait *à priori* des lois hydrostatiques, car la tension des artères est transmise par des colonnes fluides, et c'est une propriété

des fluides de presser dans tous les sens avec une parfaite égalité.

De ce que la pression exercée dans les artères est partout la même, il faut bien se garder de conclure qu'elles la supportent avec égalité, car cette puissance agit sur leur paroi interne en raison de son étendue, de sorte qu'entre deux artères, dont l'une a un diamètre double de l'autre, la première supporte une pression quadruple de celle qui agit sur la seconde.

On comprend, d'après ce principe, quel grand effort les gros troncs artériels doivent supporter comparativement aux petites branches. Il résulte deux choses importantes de cette grande différence : 1° que dans l'afflux du sang qui vient du ventricule, tous les gros troncs sont dilatés, tandis que les petites branches ne le sont pas sensiblement, quoique l'impulsion soit commune et instantanée comme le pouls l'indique; 2° que les dilatations accidentelles surviennent presque toujours dans ces gros troncs.

Nous avons vu que la réaction élastique des artères était une des causes de la tension artérielle, mais cette réaction n'existe pas partout. Les artères du cerveau contenues dans une masse molle, mais incompressible, remplissant elle-même exactement la cavité du crâne, n'avaient pas besoin de ce moyen de résister à la tension; elles l'éprouvent seulement par l'intermédiaire des colonnes liquides, et la transmettent directement à la substance cérébrale, qui se trouve ainsi constamment pressée entre la tension du sang artériel qui agit du dedans au dehors, et la résistance des os du crâne; il ne faut donc pas s'étonner si les variations de la tension artérielle ont une si grande influence sur les fonctions cérébrales.

L'ensemble des vaisseaux veineux qui rapportent le sang de toutes les parties du corps à l'oreillette droite, ne pré-

sente pas de tension sensible, c'est une sorte de réservoir membraneux ramifié, dans lequel le ventricule droit puise par aspiration et par l'intermède de l'oreillette. Les parois de ces sortes de vaisseaux, molles et extensibles, se laissent dilater presque sans réaction, quand les systèmes capillaires fournissent au système veineux plus de sang que le ventricule droit n'en peut extraire pour le projeter dans le poumon.

Le système des vaisseaux très fins, et dont la nature ne peut pas être déterminée, qui commence après les dernières artères visibles, et s'étend jusqu'aux premières veines distinctes, porte communément le nom de système capillaire. Il forme la trame de la plupart des organes. Le sang y circule vaguement, en quelque sorte, se portant dans toutes les directions à la fois, se détournant du lieu où il y a des obstacles, affluant de toutes parts vers le point où il y a une irritation; mais malgré toute cette incertitude, il reste deux points fixes et irrécusables, savoir, que les systèmes capillaires communiquent d'un côté avec le système artériel, qui est dans un état de tension énergique et constante, et de l'autre avec le système veineux, qui n'a point de tension et n'offre pas de résistance sensible à l'afflux d'un nouveau sang; il reste donc nécessaire que ce fluide passe constamment des artères dans les veines à travers le système capillaire, avec toutes les modifications que les lieux et les circonstances peuvent apporter à la liberté et à la promptitude de ce passage. Il suffit de ces considérations pour expliquer la plupart des phénomènes qui ont paru nécessiter la supposition des forces contractiles du système capillaire.

La tension artérielle que nous venons d'étudier sous plusieurs rapports spéciaux, produit dans l'économie un effet général fort remarquable : c'est à elle que les organes

doivent cette fermeté, cette rénitence qu'ils montrent dans l'état de santé, et que la maladie, la faiblesse ou l'inanition font si promptement disparaître. C'est par elle que toutes les cavités gonflées, toutes les fibres tendues, se trouvent réunies pour résister simultanément aux efforts qui tendent à les déprimer ou à les déchirer, ainsi que nous l'avons suffisamment expliqué, en traitant de la force de contraction.

Du Mouvement réel des liquides dans les vaisseaux.

218. Le mouvement réel de déplacement des liquides dans les canaux qui les contiennent, est tout à fait indépendant de la tension dont nous venons de parler; elle peut être moindre et le mouvement plus rapide, et réciproquement.

D'une autre part, la vitesse du déplacement est variable dans chaque point, la tension demeurant constante; car elle dépend de l'*aire* ou de l'étendue en surface que présente la coupe transversale des vaisseaux dans lesquels le fluide circule: ainsi, comme on l'a dit, la somme des diamètres de toutes les petites artères excédant certainement de beaucoup le diamètre de l'artère aorte, il est certain que le sang se meut beaucoup moins vite dans chacune d'elles que dans l'aorte elle-même, ce qui ne veut pas dire qu'il circule avec moins de force, puisque sa tension restant la même, il fait un égal effort pour s'échapper d'une petite artère, et pour s'échapper d'un gros tronc.

Le déplacement du sang dans les vaisseaux ne saurait s'opérer sans une certaine déperdition du mouvement primitif dont il est animé, puisque le frottement des liquides dans les tuyaux qui leur donnent passage a une valeur assez considérable, qui s'accroît même rapidement lorsque les

diamètres diminuent; mais, comme d'un autre côté, ces mêmes frottemens sont inversement proportionnels au carré de la vitesse du mouvement, on voit que cette cause de retardement ne saurait devenir bien importante dans la circulation animale. Quant aux flexuosités et aux courbures des conduits, elles ne peuvent être considérées comme des obstacles, attendu que les résistances d'un tuyau courbé sont proportionnelles aux sinus verses des angles que forment entre elles les différentes parties de la courbe, lesquels angles ayant des sinus infiniment petits, ont pour sinus verses des infiniment petits du second ordre, dont un nombre quelconque ne saurait produire une quantité finie.

De la Capillarité et de l'Endosmose considérées comme moyens d'expliquer l'absorption et l'exhalation.

219. On a fait usage, et même abus, comme cela n'arrive que trop souvent, des phénomènes remarquables qui surviennent dans les espaces capillaires, pour expliquer l'absorption dans nos organes. Nous croyons rendre un véritable service à la physiologie, en déterminant jusqu'à quel point ces applications sont possibles, et ce qu'elles peuvent avoir d'erroné.

Les conditions principales dans lesquelles l'élévation d'un liquide peut se produire à l'intérieur d'un tube, sont: 1° que ce tube soit étroit; 2° que le liquide ait plus d'attraction pour sa substance que la moitié de sa cohésion propre; 3° que le tube soit vide; 4° que ses parois soient rigides, et non susceptibles de se rapprocher sous la moindre pression.

Les deux premières conditions se rencontrent bien dans les vaisseaux lymphatiques et les radicules veineuses, mais

les deux dernières manquent complètement. Ces petits vaisseaux sont toujours remplis, et leurs parois sont si flexibles qu'il est impossible de leur supposer une tendance quelconque à conserver une capacité déterminée, ce qui est, comme on sait, la condition mécanique indispensable à la production d'une élévation quelconque de liquide dans un espace capillaire.

Il nous paraît fort difficile, après ces puissantes objections, de fonder quelque explication physiologique raisonnable de l'absorption et de l'exhalation sur la seule capillarité.

L'endosmose et l'exosmose sont des faits trop nouveaux et trop peu expérimentés jusqu'ici, pour qu'il soit permis d'essayer des systèmes qui n'auraient encore qu'une base trop étroite; mais il est fortement à désirer que les recherches physiologiques soient dirigées dans un sens qui est propre à donner les plus grandes espérances.

—

LIVRE QUATRIÈME.

DES FLUIDES ÉLASTIQUES.

CHAPITRE PREMIER.

PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DE LA MATIÈRE CONSIDÉRÉES DANS LES FLUIDES ÉLASTIQUES.

220. Il existe dans la nature un grand nombre de corps qui se distinguent de tous les autres, 1° parce que leurs molécules ne semblent jouir d'aucune attraction réciproque, ou qu'ils n'ont pas de cohésion; 2° parce que ces particules sont éminemment mobiles les unes par rapport aux autres, comme celles des liquides; 3° parce que ces molécules sont animées d'une force de répulsion qui tend à les écarter sans cesse les unes des autres, et qui produit en eux une compressibilité et une élasticité parfaites et sans limites. On a donné à ces corps le nom générique de *fluides aériformes* ou de *fluides élastiques*, soit à cause de leur ressemblance avec l'air, soit à raison de la plus remarquable de leurs propriétés.

La connaissance précise des propriétés de ce genre de corps est d'une date très récente, et la plupart d'entre eux étaient entièrement inconnus jusqu'en 1755, où Black démontra, pour la première fois, la nature du gaz acide carbonique.

On a jusqu'ici divisé les fluides élastiques en deux grandes classes : les uns qu'on a nommés *gaz* ou *fluides élastiques permanens*, conservant leur état à toutes les températures et sous toutes les pressions; les autres, qu'on a nommés *vapeurs*, ne conservant leur état qu'autant qu'on les maintient à la température qui leur a donné naissance, et sous la même pression. Cette distinction est devenue beaucoup moins absolue, et doit s'exprimer en d'autres termes depuis qu'on a trouvé des moyens de condenser en liquides presque tous les gaz proprement dits, par une très haute pression, employée seule, ou concurremment avec l'abaissement de température. Il reste néanmoins une différence essentielle entre les vapeurs et les gaz, savoir : que l'existence des vapeurs est soumise aux plus légers changemens dans les températures ou dans les pressions, tandis que les gaz sont permanens dans une très grande latitude de pression ou de température.

On peut dire encore que les gaz ne sont que des vapeurs très éloignées de leur point de saturation; ainsi l'acide sulfureux liquide à — 7 degrés et sous deux pressions atmosphériques, peut devenir vapeur à la moindre élévation de température ou pour la moindre diminution de pression; ce qui donne son point d'ébullition. Voyez le livre du *Calorique*.

La circonstance la plus remarquable de l'existence des fluides élastiques, c'est la similitude parfaite de presque toutes leurs propriétés physiques, qui permet de prendre à volonté l'un d'eux pour exemple, et d'en conclure ce que présenteraient tous les autres. On peut même dire que, sous ce point de vue, les fluides élastiques ne diffèrent les uns des autres que par le poids spécifique. Néanmoins, les fluides élastiques non permanens, ou les vapeurs, ne pouvant exister que sous quelques conditions essentielles, qui

sont intimement liées à la théorie du calorique, nous ne nous occuperons des phénomènes spéciaux que présentent ces vapeurs qu'au chapitre où nous traiterons de ce fluide impondérable, ne considérant ici que les gaz proprement dits.

Un fluide élastique composé et permanent enveloppe de toutes parts le globe que nous habitons, et forme autour de lui ce qu'on nomme l'*atmosphère*. C'est au milieu de cette atmosphère que se passent tous les phénomènes, que s'exécutent toutes les expériences; elle est pesante et comprime par conséquent, incessamment, tous les corps sur lesquels il nous est permis d'agir. Ce fluide élastique est, sans contredit, celui qu'il nous importe le plus de connaître; c'est aussi celui que nous avons sans cesse à notre disposition; et nous devrons, dans toutes les occasions, le prendre pour exemple et pour sujet de nos expériences.

DE L'ÉTENDUE, DE LA FIGURE, DE LA POROSITÉ, DE LA MOBILITÉ ET DE LA DIVISIBILITÉ DANS LES FLUIDES ÉLASTIQUES.

221. Nous comprenons sous un seul titre les modifications que présentent toutes ces propriétés de la matière dans les fluides élastiques, parce qu'elles sont simples et souvent négatives.

L'étendue que peut occuper un fluide élastique est absolument indépendante de sa constitution propre; si ses molécules étaient parfaitement libres, cette étendue serait indéfinie, car elles s'écarteraient incessamment les unes des autres, en vertu de la force de répulsion qui les anime.

On limite l'étendue des fluides élastiques en les compri-

mant, en les enfermant dans des capacités, dans des vases; et cette étendue devient alors rigoureusement celle de l'espace qu'on les force à occuper.

La figure des fluides élastiques n'a rien de plus déterminé que leur étendue; ils n'ont aucune forme propre, pas même la forme sphérique, à laquelle tendent les liquides malgré la mobilité de leurs particules, mais en vertu d'une attraction réciproque qui n'existe pas dans les fluides élastiques.

La porosité des fluides élastiques est d'une évidence parfaite, puisqu'il n'y a rien de si facile que de rapprocher leurs molécules ou de les forcer à occuper un moindre espace. Ils ressemblent, sous ce rapport, aux corps solides que nous avons nommés *essentiellement poreux.* Mais il est probable que toutes leurs molécules sont à des distances égales et très considérables les unes des autres.

La mobilité est plus remarquable dans les fluides élastiques que dans la constitution d'aucun autre genre de corps: en effet, non seulement ils peuvent se mouvoir en masse comme les solides; non seulement ils peuvent, comme les liquides, éprouver tous les genres de mouvemens partiels, en vertu de la mobilité indépendante de chacune de leurs molécules; mais encore leur élasticité parfaite transmet, multiplie et varie à l'infini le mouvement dans toutes les directions.

La divisibilité mérite à peine ce nom dans les fluides élastiques; car elle suppose l'existence préliminaire d'un corps dont les différentes parties sont réunies par un lien quelconque, et c'est ce qui n'existe jamais dans les fluides élastiques. Leur état naturel lui-même est une séparation de leurs dernières particules qui ne sont réunies par aucun lien. On peut néanmoins concevoir une seule bulle d'air introduite dans une grande capacité parfaitement vide, et

qui, comme nous le verrons, s'étendra aussitôt pour occuper tout l'espace. On sent que ce n'est pas là une division de la bulle d'air, mais seulement un écartement plus considérable des particules déjà séparées.

DE L'IMPÉNÉTRABILITÉ.

222. L'impénétrabilité des fluides élastiques semble au moins problématique au premier aperçu. En effet, tous nos mouvemens, les déplacemens de tous les corps qui sont à notre disposition, s'opèrent au milieu d'une masse d'air qui nous enveloppe de toutes parts, et qui semble ne leur opposer aucun obstacle. Cependant on observe bientôt que ces mouvemens n'ont jamais lieu sans déplacer la masse d'air qui occupait l'espace, et sans que cette masse d'air oppose une certaine résistance à son déplacement. Si l'on agite dans l'air une bande de papier, elle se fléchit dans le sens opposé au mouvement, par la résistance de l'air; si l'on agite rapidement une baguette, il se produit un sifflement qui provient d'une vive agitation de l'air. Si, deux pendules étant placés l'un près de l'autre, on fait osciller l'un des deux, l'autre se mettra peu à peu en mouvement par suite de l'agitation de l'air.

Nous avons cité (20) deux expériences très simples qui démontrent l'impénétrabilité de l'air. Nous ajouterons que, dans tous les cas où l'on recueille des gaz sur la cuve hydro-pneumatique ou à travers le mercure, on voit ces gaz déplacer le liquide dont les vases étaient remplis, ce qui est une nouvelle preuve de leur impénétrabilité. Il faut en excepter les cas où les gaz sont solubles dans les liquides, ou bien capables d'agir chimiquement sur ces substances.

Nous trouverons, en traitant de la compressibilité des

fluides élastiques, la preuve la plus absolue de leur impénétrabilité, puisque nous verrons leur force élastique s'accroître rigoureusement en proportion de la compression exercée sur eux.

CHAPITRE II.

DE L'ATTRACTION DANS LES FLUIDES ÉLASTIQUES.

223. Les fluides élastiques, considérés en grande masse, obéissent aux lois générales de l'attraction, comme tous les autres corps; ils éprouvent l'attraction terrestre, ou sont doués de pesanteur comme les corps solides ou liquides. Il existe des rapports très variables entre leurs volumes et leurs poids, et ces rapports se découvrent par des méthodes particulières. Ils sont susceptibles de se fixer en couche mince à la surface des autres corps; ils ne paraissent jouir, dans la plupart des cas, d'aucune attraction réciproque dans leurs particules. Cependant il est des circonstances récemment découvertes, dans lesquelles cette attraction semble se développer. Ils jouissent d'un genre d'élasticité particulière et plus parfaite que celle de tous les autres corps; ils sont enfin susceptibles de perdre de leur volume par la compression, et de le reprendre quand elle cesse. En conséquence, nous devrons considérer successivement, dans ce chapitre, leur poids absolu, leur poids spécifique, leur adhésion, leur cohésion, leur élasticité, leur compressibilité et leur dilatabilité.

DU POIDS ABSOLU.

224. Lorsque nous avons traité du poids absolu dans les

corps solides ou liquides, nous n'avons pas dû avoir la pensée d'administrer la preuve de l'existence de ce poids, parce qu'il constitue une notion vulgaire, et qu'il est facilement appréciable dans tous les cas. Il n'en est pas de même des poids des fluides élastiques : long-temps on a nié la pesanteur de l'air, et même aujourd'hui cette propriété a besoin d'être prouvée. Cette grande différence tient à ce qu'un volume quelconque d'air que nous soumettons à nos expériences, est plongé au milieu d'une grande masse d'un air tout à fait semblable, en sorte que le volume d'air examiné, s'il a un poids quelconque, doit le perdre, et le perd en effet complètement, lorsqu'il est ainsi plongé dans un fluide de même densité que lui. Pour rendre cette proposition sensible, on peut se représenter que s'il existait un être intelligent et expérimentateur qui, par sa constitution, dût habiter constamment les profondeurs de l'Océan, l'eau ne lui semblerait sans doute jouir d'aucune pesanteur, à moins qu'il ne fût parvenu, par des moyens ingénieux, à isoler les effets de la pesanteur d'un certain volume d'eau, des influences de la masse générale.

C'est en 1740 que Galilée démontra, pour la première fois, que l'air qui nous environne est pesant; il s'aperçut de cette propriété en comprimant de l'air dans un ballon, qui devenait plus lourd, à proportion qu'il y avait introduit plus d'air.

Aujourd'hui on peut démontrer et déterminer avec exactitude la pesanteur de l'air par le moyen suivant : on prend un ballon muni d'un robinet, on le pèse avec exactitude, on le remplit ensuite d'eau distillée à une température connue, et on le pèse de nouveau. Le poids de la quantité d'eau qu'il peut contenir étant ainsi déterminé, on connaît parfaitement son volume, puisqu'on sait qu'un centimètre cube d'eau pèse un gramme. La capacité du

ballon étant déterminée, on le vide et on le sèche parfaitement, après quoi, au moyen de la machine pneumatique, dont nous ferons bientôt connaître le mécanisme, on fait le vide le plus complet possible dans ce ballon, en tenant note de la petite quantité d'air que l'on est contraint d'y laisser. On pèse alors le ballon vide avec beaucoup de soin, puis on ouvre le robinet et on y laisse rentrer l'air : on s'aperçoit aussitôt que son poids est augmenté, et ce qu'on est obligé de placer dans le plateau opposé de la balance pour rétablir l'équilibre représente exactement le poids du volume d'air qui s'est introduit dans le ballon; on a trouvé par cette méthode, qu'à zéro de température, et le baromètre étant à $0^{m},760^{mm}$, un décimètre cube d'air pèse 1 gr. 2991. D'où il suit qu'un mètre cube d'air pèse 1 kil. 2991, c'est-à-dire que l'air est environ 769 fois moins pesant que l'eau.

Ces données de l'expérience supposent que l'on a pris toutes les précautions convenables pour rectifier les erreurs qui proviendraient 1° des variations de volume de l'air suivant la température; 2° des variations de volume dépendantes du plus ou moins de pression.

On a coutume de rapporter les résultats des expériences au zéro du thermomètre pour la température, et à une hauteur barométrique de $0^{m},760$, qui exprime une certaine pression de l'atmosphère. Mais comme les expériences se font presque toujours à des températures différentes et sous d'autres pressions, il devient nécessaire de ramener, par le calcul, les résultats obtenus à ce qu'ils auraient été sous ces deux conditions. Pour cela, on fait usage de deux règles très générales et très simples, que nous nous contenterons de donner ici comme des faits, nous réservant de les expliquer et de les démontrer en temps et lieu.

La première de ces méthodes est relative à la tempéra-

ture. On trouve le volume qu'aurait occupé le gaz, à zéro de température, en divisant le volume obtenu à une température quelconque par 1 plus ou moins la fraction 0,00375 répétée autant de fois qu'il y aura de degrés du thermomètre centigrade au dessus ou au dessous de zéro. (Voy. *Calorique*, art. *Dilatation des gaz.*)

La rectification relative aux pressions consiste à établir la proportion suivante : la hauteur barométrique $0^{m},760$ est à la hauteur barométrique observée pendant l'expérience, comme le volume mesuré du gaz est à un quatrième terme, qui sera le volume que le même gaz aurait eu sous la pression constante $0^{m},760$. (Voy. *Compressibilité des fluides élastiques.*)

Il existe encore deux sortes de rectifications, qu'il serait indispensable d'appliquer aux expériences pour obtenir des résultats rigoureusement exacts; elles sont relatives, 1° à la différence de pesanteur que peut offrir le ballon lui-même lorsqu'on le pèse dans une atmosphère plus ou moins chaude; 2° aux variations que peut présenter la capacité du ballon à diverses températures. Ces deux causes d'erreur produisent des effets peu sensibles, surtout la dernière, et peuvent la plupart du temps être négligées. Au reste, on trouve, dans le grand *Traité de Physique* de M. Biot, la formule générale au moyen de laquelle on peut obtenir toutes les rectifications.

Tous les gaz, autres que l'air, peuvent être exactement pesés par des méthodes analogues, après qu'on les a obtenus et purifiés par des moyens chimiques convenables. Il faut seulement remarquer que plusieurs d'entre eux étant capables d'attaquer les métaux dont on construit ordinairement les robinets, il devient pour ceux-là nécessaire d'employer un ballon muni d'un robinet de cristal.

Le poids des vapeurs est beaucoup plus délicat à con-

stater que celui des gaz, il est même difficile de les peser directement avec exactitude; et nous verrons, à l'article *Calorique*, quelles sont les méthodes que l'on a dû substituer à l'emploi direct de la balance.

DU POIDS SPÉCIFIQUE.

225. Les différens fluides élastiques qui ont été découverts jusqu'à présent, présentent, comme tous les autres corps, des poids différens sous un volume égal. Il est même remarquable que les différences de pesanteur entre les gaz sont infiniment plus considérables qu'entre les corps solides ou les corps liquides, puisque nous connaissons des fluides élastiques cent vingt fois plus pesans les uns que les autres.

Une circonstance très importante à remarquer, quand on cherche à déterminer le poids spécifique des fluides élastiques, c'est que le volume sur lequel on agit n'a rien de constant par lui-même, et qu'il dépend absolument de la pression que le gaz éprouve, de la température à laquelle il est; d'où il suit qu'en notant le poids spécifique, il faut toujours énoncer en même temps la pression et la température. On est généralement convenu de ramener, par le calcul, tous les résultats d'expérience à la supposition de 0° température et de $0^{m},760$ de pression.

Le poids spécifique du gaz se compare toujours au poids d'un pareil volume d'air pris pour unité.

On conçoit que la méthode employée pour obtenir les poids spécifiques des gaz est exactement celle que nous venons de décrire en parlant de leur poids absolu, et qu'il suffit de peser les différens gaz dans le même ballon pour avoir les rapports de poids d'un même volume. Il ne reste ensuite qu'à établir la proportion $P : P' :: 1 : x$, P étant le

poids de l'air, P' le poids du gaz, et x le poids spécifique cherché.

Indépendamment de toutes les précautions et rectifications que nous avons indiquées en parlant de la mesure du poids absolu, il est encore très important de priver complètement les gaz d'humidité, ce qu'on obtient en les laissant séjourner sur un corps très avide d'eau, comme le chlorure de calcium. La plus légère négligence peut avoir ici les résultats les plus graves, car il est des gaz, comme l'hydrogène, qui sont environ quinze fois plus légers que l'air, tandis que la vapeur d'eau qu'il pourrait contenir est à peu près sept fois plus pesante que le gaz pur; en sorte que la plus petite quantité de cette vapeur mêlée au gaz en augmenterait considérablement le poids spécifique.

On ne connaît que quatre gaz simples et plus de vingt qui sont composés. Pour les gaz simples, on ne peut avoir recours qu'à l'expérience directe; mais on conçoit que pour les gaz composés on peut déterminer le poids spécifique par un calcul. En effet, si un gaz est formé de l'union de deux gaz simples dont on connaisse le poids spécifique, si l'on sait en quelles proportions les deux gaz s'unissent, si l'on a déterminé quel changement le volume des deux gaz a subi lors de la combinaison, on pourra toujours calculer le poids spécifique du produit. Par exemple, le poids spécifique du chlore est de 2,4260, celui de l'hydrogène, est de 0,0688; ces deux gaz s'unissent à volumes égaux et sans condensation pour former le gaz acide hydrochlorique : la combinaison aura $2,4260 + 0,0688$ de poids pour les deux volumes réunis, ou 1,2474 pour un seul volume; ce qui donne le poids spécifique du gaz acide hydrochlorique. L'expérience directe donne le même résultat.

Il arrive souvent que ces deux moyens ne sont pas aussi bien d'accord, et dans la plupart des cas l'exactitude est

du côté du calcul. On trouvera des détails sur la combinaison des gaz et sur leurs propriétés aux mots *Affinité*, *Air*, *Gaz* et *Poids spécifique*, de notre *Dictionnaire de Chimie*.

Nous donnons ici un tableau du poids absolu et spécifique des gaz et des vapeurs à zéro température et sous la pression de $0^{m},760^{mm}$, par expérience et par calcul, le poids de l'air étant pris pour 1,0000.

TABLEAU DES DENSITÉS DES GAZ ET DES VAPEURS.

NOMS DES FLUIDES ÉLASTIQUES.	DENSITÉ DÉTERMINÉE PAR EXPÉRIENCE.	DENSITÉS CALCULÉES.	POIDS DE 1 DÉCIM. CUBE DE GAZ SUIV. L'EXPÉRIENCE.	POIDS DE 1 DÉCIM. CUBE DE GAZ SUIVANT LE CALCUL.
			gramme.	
Air	1,0000		1,2991	
Gaz hydriodique	4,4288	4,3399	5,7719	
— phtoro-silicique	3,5735		4,6423	
— chloroxi-carbonique		3,3990		4,4156
Chlore	2,4216	2,4260	3,2088	3,1516
Deutoxide de chlore		2,3155		3,0081
Gaz phtoro-borique	2,3709		3,0800	
— sulfureux	2,1930		2,8489	
— *id.*	2,234			
Cyanogène	1,8064	1,8197	2,3467	2,3640
Protoxide d'azote	1,5269	1,5269	1.9752	1,9836
Acide carbonique	1,5196		1,9741	
— *id.*	1,5245		1,9805	
Gaz hydrochlorique	1,2474	1,2474	1,6205	1,6205
— hydrosulfurique	1,1912		1,5475	
— oxigène	1,1036		1,4337	
— *id.*	1,1025		1,4323	
Deutoxide d'azote	1,0388	1,0390	1,3495	1,3498
Hydrogène per-carburé		0,9816		1,2752
Gaz azote	0,9691		1,2590	
— *id.*	0,9757		1,2675	
Oxide de carbone	0,9569	0,9732	1,2431	1,2643
Hydrogène per-phosphoré	1,7610			
— proto-phosphoré	1,2000			
— *id.*	0,9716			
Gaz ammoniacal	0,5967	0,5910	0,7752	0,7678
Hydrogène proto-carburé		0,5596		0,7270
— arsénié	2,695			
— *id.*	0,5552			
Gaz hydrogène	0,0688		0,0894	
Vapeur d'iode	8,716			
— de mercure	6,976	9,06 5		
— d'éther hydriodique	5,4749		7,1124	
— d'essence de térébenthine	5,0130	4,2108	6,5124	5,4703
— d'hydro per-carbure de chlore	3,4434	3,4076	4,4733	4,4268
— nitreuse		3,1805		4,1318
— de sulfure de carbone	2,6447		3,4357	
— d'éther sulfurique	2,5860	2,5832	3,3595	3,3558
— d'éther hydrochlorique	2,219	2,2290	2,8827	2.8957
— d'acide chloro-cyanique		1,1228		2,7577
— d'alcool absolu	1,6133	1,6016	2,0958	2,0806
— d'acide hydrocyanique	0,8476	0,9442	1,2310	1,2266
— d'eau	0,4235	0,6200	0,8100	0,8054
— de carbone		0,622		0,5482

Les grandes différences qui se trouvent entre les poids spécifiques des gaz donnent lieu à des phénomènes naturels remarquables et à des expériences curieuses. La grotte du chien, dans laquelle un de ces animaux est asphyxié, tandis que l'homme y respire librement, doit cette propriété ou dégagement de l'acide carbonique, qui, étant plus pesant que l'air, en occupe la partie inférieure. On peut verser cet acide carbonique, comme de l'eau d'un vase dans un autre; on peut aussi verser le gaz hydrogène d'un vase dans un autre, mais de bas en haut, à cause de sa légèreté comparativement à l'air; la même légèreté est cause qu'un ballon s'élève dans l'air lorsqu'il est rempli de ce gaz.

On peut remarquer ici un de ces exemples trop communs de l'application des demi-connaissances physiques à la science de l'homme; on a souvent dit que l'acide carbonique résultant de la respiration d'un grand nombre d'hommes rassemblés devait occuper les lieux les plus bas de l'enceinte. Cependant il en est tout autrement; car, pendant qu'il s'échappe des poumons 0,03 environ d'acide carbonique, moitié plus lourd que l'air, il se produit en même temps une beaucoup plus grande proportion de vapeur d'eau, qui est deux fois plus légère; en sorte que le mélange expiré, d'ailleurs échauffé à la température de la poitrine, est beaucoup plus léger que l'air atmosphérique environnant, et s'élève par conséquent. On observe en effet que le lieu le plus malsain d'une salle de spectacle est la partie supérieure.

DE L'ADHÉSION.

226. L'adhésion des fluides élastiques aux autres corps solides ou liquides, pour n'être pas aussi facile à constater

que celle de ces corps entre eux, n'en est pas moins réelle, et l'on peut dire que tous les corps qui se déplacent dans l'air sont enveloppés d'une couche de ce fluide aériforme, qui les accompagne partout, à peu près comme l'atmosphère elle-même accompagne la masse de la terre, soit dans son mouvement de translation, soit dans son mouvement de rotation.

La présence de cette couche adhérente se manifeste dans beaucoup de circonstances. Si l'on remplit doucement d'eau un vase de verre bien transparent, on apercevra une foule de petites bulles d'air, qui, malgré leur légèreté spécifique qui tendrait à les faire monter au dessus du liquide, restent adhérentes aux parois du vase; il est même essentiel, dans les expériences de physique et de chimie, de se tenir en garde contre ces petites quantités de gaz qui restent dans les vases que l'on croit avoir complètement remplis d'eau. Lorsqu'on jette un morceau de sucre dans un verre d'eau, pendant qu'il se fond spontanément, on en voit des fragmens s'élever au dessus de l'eau, environnés de bulles d'air qui leur sont adhérentes. Enfin une foule de corps beaucoup plus pesans que l'eau surnagent pourtant ce liquide quand ils sont en petits fragmens ou en poudre, ce qui dépend de l'adhérence d'une couche d'air à leur surface. En général, on peut dire qu'un corps surnagera l'eau toutes les fois que l'excès de son poids sur celui d'un pareil volume d'eau ne surpassera pas la force d'adhérence de la couche d'air qui l'environne. On peut répéter cette expérience avec des aiguilles fines d'acier, qui surnagent l'eau quand on les dépose longitudinalement et demeurent à sa surface, tandis qu'elles s'y enfoncent quand on les plonge verticalement.

DE LA COHÉSION.

227. Jusqu'à l'époque récente des observations de M. Cagnard de Latour, sur la formation des vapeurs sous de très hautes pressions, nous n'aurions eu rien à dire sur la cohésion des fluides élastiques, sinon qu'elle était nulle. En effet, de Laplace a établi que la constitution des corps résultait de trois ordres de puissances : 1° la force de cohésion des particules du corps; 2° la force de répulsion du calorique; 3° l'attraction du calorique pour les particules du corps. Il admettait qu'au moment de la transformation d'un corps en fluide élastique, la première de ces puissances, ou la cohésion, devenait nulle, et il en concluait ce qui se vérifie en effet, jusqu'à présent, pour les gaz, que la force élastique des fluides élastiques devait être précisément proportionnelle à la quantité de calorique dont on les pénétrait, c'est-à-dire proportionnelle aux températures. Mais M. Cagnard de Latour a trouvé qu'un liquide comme l'alcool pouvait se réduire en vapeur dans un espace fermé, à peine double de son volume, et que dans cet état la vapeur avait une force élastique infiniment moindre que ne l'indiquait l'élévation de température. Il est évident que cette diminution dans la force d'écartement des molécules ne saurait provenir que de l'influence de la cohésion, qui reprend un certain empire dans ce haut degré de condensation des vapeurs; ce qui se conçoit, en effet, puisque leur volume excède de si peu celui du corps liquide qui leur a donné naissance.

On doit donc dire dans l'état actuel des connaissances, que les fluides élastiques ne jouissent d'aucune cohésion *sensible*, sous des pressions médiocres; mais qu'ils paraissent susceptibles de reprendre une certaine cohésion

quand on rapproche leurs molécules par de hautes pression.

DE L'ÉLASTICITÉ.

228. Nous avons vu que l'élasticité des corps solides devait être attribuée plutôt au changement de situation des particules les unes par rapport aux autres, s'opérant malgré leur état de situation fixe, que par un véritable rapprochement de ces particules. Il n'en est pas de même des fluides élastiques : cette propriété se développe par la pression même qui diminue leur volume, et elle se déploie en ramenant le fluide élastique à son volume primitif lorsque la pression cesse.

Il paraît évident que l'élasticité de ces sortes de corps appartient tout entière à la force de répulsion du calorique qui leur est plus ou moins intimement combiné. Une foule de circonstances vulgaires prouvent l'élasticité des gaz. Un ballon flexible rempli d'air se déprime par le choc ou par la pression, et rebondit ensuite en reprenant sa forme et son volume primitifs. Si l'on essaie d'enfoncer un piston dans un corps de pompe fermé de toutes parts, on réussit en effet, par une compression plus ou moins forte, à diminuer plus ou moins le volume d'air accumulé dans le corps de pompe ; mais aussitôt que la pression cesse, le piston remonte précisément au point d'où on l'avait fait descendre pour comprimer l'air, c'est-à-dire que celui-ci reprend son volume primitif.

L'élasticité des gaz a passé long-temps pour être parfaite, c'est-à-dire indestructible par les plus fortes pressions, et toujours capable de rétablir intégralement le volume primitif du gaz. On a reconnu, depuis peu, que presque tous les gaz réputés permanens étaient susceptibles

de se liquéfier sous des pressions très considérables aidées de l'action d'un froid artificiel ; et de plus, que quelques-uns d'eux, comme l'acide sulfureux, par exemple, pouvaient ensuite conserver l'état liquide, quoique la compression vînt à cesser, ce qui suppose une élasticité vaincue par l'effort comprimant.

Dans toutes les expériences que l'on peut faire sur l'élasticité de l'air et des gaz, il ne faut pas oublier que, dans l'état où nous les employons ordinairement, ils sont déjà comprimés par toute la pression de l'atmosphère qui nous entoure, pression très considérable, puisqu'elle est représentée par une colonne de mercure de 28 pouces ou de $0^{m},760$, ainsi que nous le démontrerons à l'article *Atmosphère*.

La perfection même de l'élasticité des gaz, dans toutes les circonstances usuelles, entraîne naturellement une conséquence extrêmement remarquable, savoir, que, si l'on exerce sur un volume donné de gaz, une pression supérieure à celle qu'il éprouvait dans son état naturel, le volume de ce gaz diminuera d'abord jusqu'à un certain point; et, par ce rapprochement des molécules, l'élasticité du gaz augmentera jusqu'à ce qu'elle fasse équilibre à la nouvelle pression, en sorte qu'à ce point la diminution du volume s'arrêtera. Il était extrêmement intéressant de reconnaître et de démontrer les rapports qui s'établissent ainsi entre la pression, le volume du gaz et son élasticité. Mariotte y est parvenu au moyen de l'expérience suivante. Si l'on prend un tube recourbé A B C (*fig.* 85), dont la courte branche B C soit fermée et dont la longue branche B A soit ouverte ; si l'on introduit dans ce tube une goutte de mercure qui s'arrête au point B, on aura renfermé dans la branche B C un certain volume d'air, qui, d'après ce que nous venons de dire, est actuellement pressé par le

poids de l'atmosphère équivalent à une colonne de mercure de 28 pouces. Si, dans cet état, on verse dans la branche A B une telle quantité de mercure que celui-ci s'élève à vingt-huit pouces au dessus de son niveau dans le tube B C, il sera évident, d'après nos lois de la statique des liquides, que cette colonne comprimera l'air contenu dans le tube B C, d'un nouveau poids égal à celui que représentait la pression de l'atmosphère; on aura donc doublé la pression. Si l'on observe alors le volume qu'occupera l'air dans la branche B C, on trouvera que le mercure est remonté jusqu'au point *b* dans cette branche, et qu'en conséquence le volume de l'air a été réduit à moitié. Si l'on ajoute alors dans la branche B A assez de mercure pour élever encore son niveau de deux fois 28 pouces (56 pouces), le volume de l'air se trouvera réduit au quart; et ainsi de suite dans les mêmes proportions, si le tube B A est assez long pour contenir les colonnes successives de mercure ajouté. On voit donc que le volume de l'air devient moitié plus petit quand la pression est double, quatre fois plus petit quand la pression est quadruple; et si, par une marche inverse, on enlève successivement les colonnes de mercure ajoutées, on voit l'air repasser successivement aussi par les différens volumes que les pressions lui avaient fait perdre.

De ces faits démonstratifs Mariotte a conclu la loi qui porte son nom, et qu'on exprime ainsi :

L'élasticité des gaz est toujours directement proportionnelle aux pressions qu'ils supportent, et les volumes inversement proportionnels à ces pressions.

D'où il suit que l'élasticité est elle-même en raison inverse des volumes, ainsi que la densité.

Les vapeurs paraissent soumises exactement à la loi de Mariotte, pourvu que les conditions de leur existence soient maintenues; en sorte, par exemple, que leur tem-

rature doit s'élever à mesure qu'on les comprime, comme nous le verrons au livre du *Calorique*.

Tout ce que nous venons de dire sur l'élasticité des gaz et ses rapports avec leur volume, doit être considéré, abstraction faite de leur température; car une addition de calorique les dilate ou augmente leur force élastique, comme une soustraction de la même cause les condense ou diminue cette même force, le tout suivant des lois que nous exposerons en traitant des effets du calorique sur les corps.

Nous devons faire observer que l'on donne très souvent le nom de *tension* au degré de force élastique que présentent les fluides élastiques en général. Nous verrons, en traitant de l'atmosphère et de ses effets, comment on est parvenu à mesurer exactement cette tension.

229. Il est toujours facile de comprimer l'air ou un gaz quelconque, contenu dans une cavité circonscrite, soit par la pression d'un liquide, soit par un moyen mécanique général, dont nous allons donner une idée.

Le ballon A (*fig.* 84) est surmonté d'un cylindre B, parfaitement rodé dans son intérieur, qui peut être parcouru, sans beaucoup d'effort, par un piston C, muni d'une tige D, à laquelle on applique la puissance. Le ballon est séparé du cylindre par une cloison, percée d'une ouverture garnie d'une petite soupape *b*, qui s'ouvre quand elle est pressée de haut en bas, qui se ferme quand elle est pressée de bas en haut. Le piston est lui-même percé d'une ouverture garnie d'une soupape *a*, qui s'ouvre et se ferme dans les mêmes circonstances que la première. Tout étant ainsi disposé, et tout l'appareil plein d'air sous la pression ordinaire, si l'on abaisse le piston, on tendra à comprimer l'air contenu dans le corps de pompe B; sa force élastique augmentera, la soupape *a* se fermera, la soupape *b* s'ou-

vrira; et si le piston descend ainsi jusqu'au bas du corps de pompe, tout l'air que celui-ci contenait passera dans le ballon A. Si l'on essaie alors de relever le piston, l'élasticité augmentée de l'air du ballon fermera la soupape *b*; le poids de l'air atmosphérique ouvrira la soupape *a*; le ballon conservera tout l'air qui y a déjà été introduit, et le corps de pompe se remplira d'un nouveau volume d'air atmosphérique; en sorte que si l'on abaisse une seconde fois le piston, le jeu de la machine recommencera, et on pourra répéter cette opération jusqu'à ce que la force élastique de l'air dans le ballon soit devenue supérieure à la force que l'on peut employer pour descendre le piston, et par conséquent ne permette plus l'ouverture de la soupape *b*.

L'appareil que nous venons de décrire est une *pompe foulante à air*, ou *de compression*. On réussit par ce moyen à comprimer l'air au point de renfermer dans une capacité quarante fois le volume d'air qu'elle contenait d'abord, et on donne par conséquent à cet air une force élastique correspondante à quarante fois la pression atmosphérique qu'il supportait dans son état primitif.

On conçoit que, l'air étant ainsi comprimé dans un réservoir A, si l'on venait à ouvrir subitement la soupape *b*, par le choc d'une tige métallique, qui passerait dans l'ouverture de la cloison, une certaine quantité de l'air comprimé s'échapperait tout à coup avec une violence proportionnée à sa force élastique. C'est précisément ce qui arrive dans le *fusil à vent*. Sa crosse est un réservoir d'air construit solidement en fer battu, muni d'une soupape à son ouverture, et pouvant se monter à vis sur une pompe de compression. On accumule de l'air dans cette crosse jusqu'à ce qu'on ne puisse plus faire jouer la pompe, et on adapte la crosse à un canon garni d'une batterie tellement

disposée, que le chien de fusil, en s'abattant, pousse avec violence une tige métallique qui ouvre, pour un instant, la soupape du réservoir d'air : on a introduit dans le canon une balle de plomb exactement calibrée, et, dans le moment où l'air s'échappe du réservoir, il chasse cette balle avec une vitesse comparable à celle que pourrait produire la poudre à canon.

La fontaine de compression est un instrument fondé sur les mêmes principes. Un vase solide A (*fig.* 85) est en partie rempli d'eau; son ouverture supérieure porte un tube qui descend presque au fond du liquide et qui communique à l'extérieur; on peut visser sur ce tube une pompe foulante B; l'air qu'elle fait pénétrer dans l'appareil traverse le liquide, et vient s'accumuler dans la partie supérieure vide. Lorsqu'on croit la compression suffisante, on ferme le robinet C; on enlève la pompe B, et on lui substitue une pièce D, nommée *ajutage*, qui ne présente qu'une ouverture étroite. Si l'on ouvre alors le robinet, le liquide, pressé à sa face supérieure par la force élastique de l'air, et qui, comme nous le savons, transmet indifféremment les pressions dans tous les sens, s'échappe par le tube et s'élève par l'ouverture en un jet dont la hauteur dépend de la compression de l'air et peut être très considérable.

La fontaine de Héron, fondée sur les mêmes principes, produit, en apparence, un phénomène contraire à toutes les lois de l'hydrostatique, puisqu'elle élève l'eau bien au dessus du niveau de son réservoir. La *fig.* 86 en fera concevoir le mécanisme. Le ballon C est à moitié rempli d'eau, le réservoir A communique avec ce ballon par le tube *a b*, et ce tube plonge au fond du liquide; par conséquent, si le ballon C n'avait pas d'issue, l'air renfermé dans sa partie supérieure serait comprimé en proportion de la hauteur de la colonne d'eau *a b*. Mais la partie supérieure de ce ballon

communique avec un vase B à moitié rempli d'eau, par un tube *c d*, qui traverse le liquide et se rend dans l'espace plein d'air. Il en résulte que la compression exercée par la colonne *a b* sur l'air du ballon C, se transmet à l'air du ballon B, qui comprime à son tour la face supérieure du liquide contenu dans ce ballon. Enfin du fond du liquide s'élève un tube *e f*, qui traverse, sans communiquer avec lui, le premier réservoir A, et s'ouvre dans l'air par un ajutage étroit. Le liquide comprimé dans le vase B s'élève donc par ce tube, et forme un jet au dessus de l'extrémité *f*.

On voit que cet appareil ne peut marcher qu'autant que les deux réservoirs B et C contiennent chacun de l'eau et de l'air, et qu'on entretient de l'eau dans le réservoir A, Mais pendant le jeu de la machine, le réservoir C se remplit d'eau; elle s'élève par le tube *c d* et remplit à son tour le réservoir B; ce qui arrête nécessairement le mouvement de la machine.

On peut déguiser une construction de ce genre sous toutes sortes de formes extérieures qui empêchent d'en apercevoir le mécanisme. MM. Girard frères ont fait une heureuse application de ce moyen à la construction des lampes à niveau constant, qu'ils ont nommées *lampes hydrostatiques*. Le mécanisme que nous avons décrit est enfermé dans la colonne qui supporte la lampe; on commence par remplir d'huile tous les réservoirs à l'aide d'une ouverture qui se ferme ensuite exactement; puis, en renversant la lampe, on laisse écouler une certaine quantité d'huile, qui fait place à l'air nécessaire au jeu de la machine.

Toutes les machines soufflantes, depuis l'instrument vulgaire dont on fait usage pour animer le feu de nos foyers, jusqu'à celles qui alimentent la combustion dans

les plus grandes forges, sont fondées sur l'élasticité de l'air : elles varient beaucoup dans la forme des moyens employés; mais on a presque généralement adopté depuis quelque temps, dans les usines, le corps de pompe et le piston que nous avons décrits au commencement de cet article, et qu'on établit sur de très grandes dimensions.

230. *Dilatabilité des fluides élastiques.* Jusqu'ici, pour mettre en jeu et démontrer l'élasticité des fluides élastiques et de l'air en particulier, nous avons pris un certain volume de cet air actuellement soumis à la pression constante de l'atmosphère, et nous avons accru cette pression en diminuant son volume. Mais si la loi de Mariotte est vraie, des phénomènes du même genre, mais dans un ordre inverse, devront se présenter, si nous prenons un volume d'air actuellement soumis à la pression atmosphérique et que nous venions à diminuer cette pression, ou bien à agrandir l'espace dans lequel le gaz est enfermé. C'est ce qui se réalise en effet dans toutes les expériences. Si l'on prend un vase profond AB, qu'on le remplisse de mercure, que l'on introduise dans son intérieur un tube CD, fermé par en haut et ouvert par le bas, et aussi rempli de mercure, excepté le volume d'air occupant l'espace C*a*, et si l'on enfonce les deux tubes l'un dans l'autre jusqu'à ce que le mercure soit au même niveau au dedans et au dehors du petit tube, il est évident que l'air n'éprouvera aucune pression de la part de ce mercure, et que, dans cet état, il occupera le volume déterminé par la pression atmosphérique ordinaire. Mais si l'on vient à élever peu à peu le tube CD, le mercure intérieur à ce petit tube s'élevera avec lui, et en même temps le volume de l'air augmentera. Si l'on s'arrête au moment où la colonne de mercure sera élevée de 14 pouces au dessus de son niveau dans le grand vase, on trouvera que le volume de l'air a doublé; et, en

effet, cette colonne de mercure, de 14 pouces, élevée dans le petit tube, représente et emploie la moitié de la pression atmosphérique exprimée par 28 pouces; l'autre moitié agit donc seule pour comprimer l'air. Son volume doit donc être double, et son élasticité moitié moindre. C'est ainsi que la loi de Mariotte se vérifie, soit au dessus, soit au dessous des pressions atmosphériques ordinaires.

Cette propriété des gaz, de se dilater quand on diminue les pressions qu'ils éprouvent, a été mise à profit aussi bien que celle de se comprimer dans les cas inverses, et nous lui devons l'invention précieuse de la machine pneumatique. Nous expliquerons d'abord, dans une machine simple, le mécanisme de la raréfaction de l'air, nous donnerons ensuite une idée du mécanisme compliqué de la machine pneumatique usitée de nos jours.

Si nous supposons (*fig.* 88) un ballon muni d'un corps de pompe et disposé de la même manière que dans la *fig.* 84, avec cette différence que la soupape *b* s'ouvre par une pression de bas en haut et se ferme par une pression de haut en bas, ainsi que la soupape du piston *a*; si tout l'appareil est rempli d'air à la pression ordinaire, et qu'on fasse descendre le piston, la soupape *b* restera fermée, la soupape *a* s'ouvrira, et tout l'air du corps de pompe s'échappera par l'ouverture du piston. Dans cet état, si l'on élève le piston, l'air extérieur ne pourra plus rentrer par la soupape *a*; mais celui du ballon cessant d'être comprimé, même par le poids de l'atmosphère, qui sera supporté tout entier par la face supérieure du piston ascendant, pressera sur la soupape *b* et l'ouvrira pour passer dans le corps de pompe; en sorte que quand le piston sera arrivé au haut du corps de pompe, le volume d'air qui était enfermé dans la capacité du ballon, se trouvera occuper à la fois cette capacité, plus celle du corps de pompe; son volume

étant ainsi accru, son ressort sera diminué dans le même rapport, en sorte qu'il faudra employer un certain effort pour soutenir le piston, qui sera pressé plus fortement par l'air extérieur que par l'air intérieur. En supposant que la capacité du ballon soit égale à celle du corps de pompe, l'air aura doublé de volume, et sa force élastique sera diminuée de moitié. Mais l'élasticité de l'air dans le ballon et dans le corps de pompe sera exactement la même; et si le piston s'abaisse de nouveau, la soupape *b* se fermera immédiatement : le piston descendra jusqu'à la moitié du corps de pompe, sans que la soupape *a* soit déterminée à s'ouvrir; mais s'il continue à s'abaisser, elle s'ouvrira, et l'air du corps de pompe s'échappera par l'ouverture du piston, jusqu'à ce qu'il soit arrivé en bas. Si on élève de nouveau le piston, l'air du ballon, qui avait déjà perdu la moitié de son élasticité, doublera encore une fois de volume, et perdra ainsi la moitié de la demi-élasticité qu'il avait conservée, il sera ainsi réduit au quart de son élasticité primitive. En continuant à faire mouvoir alternativement le piston, on doublera sans cesse les volumes de l'air restant dans le ballon, et l'on réduira son élasticité à $\frac{1}{8}$, à $\frac{1}{16}$, à $\frac{1}{32}$, à $\frac{1}{64}$, à $\frac{1}{128}$, etc., par une progression géométrique décroissante qui ne peut jamais parvenir à zéro d'élasticité, mais qui prouve qu'on peut la réduire à être presque insensible. C'est dans cet état que l'on dit qu'on a fait le vide dans le ballon, quoiqu'il y reste toujours une quantité d'air, qui est d'autant plus petite que le piston s'ajuste plus exactement, que les soupapes se meuvent avec plus de facilité, et que le corps de pompe est plus grand relativement à la capacité du ballon.

231. *De la machine pneumatique.* Cet instrument, si précieux pour les physiciens, était réduit, lorsque Boyle l'a imaginé, à la simplicité de l'appareil que nous venons

de décrire. Le corps de pompe était tourné en bas, le piston se mettait en mouvement au moyen d'un étrier dans lequel on plaçait le pied; on empêchait le retour de l'air dans le ballon au moyen d'un robinet que l'on fermait quand le piston s'approchait du ballon, et qu'on ouvrait quand il s'en éloignait. Mais on imagina bientôt de fixer le tuyau qui communiquait au corps de pompe, au centre d'un plateau de cuivre, recouvert d'un cuir mouillé sur lequel on posait une cloche renversée, ce qui permettait de faire le vide dans des vases à large ouverture.

La machine pneumatique a été considérablement perfectionnée depuis cette époque; celle dont on fait maintenant usage est disposée à peu près de la manière suivante: sur un plateau de cuivre circulaire, on mastique avec soin une rondelle de glace dépolie; un canal pratiqué sous ce plateau vient aboutir à son centre, et passe à travers la glace qui est percée dans ce point. Un pas de vis ménagé à l'extrémité du canal permet d'y ajuster directement des vases à robinet dans lesquels on veut faire le vide; les cloches de cristal, dont on fait un fréquent usage, sont usées et dressées sur leur bord de manière à s'appliquer exactement sur le plateau de glace, sans autre intermède qu'une graisse.

Le canal dont nous avons parlé se porte vers un des côtés du plateau, et se bifurque bientôt pour communiquer avec la partie inférieure de deux corps de pompes, situés parallèlement et verticalement à quelque distance du plateau, munis chacun de leurs pistons ayant pour tiges conductrices des crémaillères dont les dents se regardent; entre ces deux crémaillères se trouve une roue dentée munie d'une double manivelle, et tellement disposée qu'un piston s'abaisse toujours quand l'autre s'élève. Cet arrangement a l'avantage de compenser l'effort qu'il faut faire

pour soulever un piston par la force qui tend à faire descendre l'autre, en sorte que la puissance totale est beaucoup moindre qu'avec un seul piston.

Dans la longueur du canal horizontal, entre les corps de pompe et le plateau, se trouve un robinet travaillé avec beaucoup de soin et percé de différentes ouvertures; en telle sorte que, dans une position, il permet la communication des corps de pompe avec le vase où l'on fait le vide; que, dans une autre, il intercepte cette communication, et que, dans une troisième, il ouvre l'accès à l'air extérieur pour pénétrer dans le vase où l'on a fait le vide.

Les soupapes qui doivent, comme nous avons vu, se trouver en bas des corps de pompe et dans les pistons mêmes, peuvent être construites d'un grand nombre de manières différentes. Leur condition essentielle est de pouvoir s'ouvrir avec le moindre effort possible; car lorsque le vide est très avancé, la force élastique de l'air est extrêmement petite. M. Fortin a imaginé des moyens mécaniques, qui font que ces soupapes s'ouvrent par l'effet même du mouvement du piston et sans qu'il soit nécessaire de compter sur la force élastique. La construction la plus usitée est la suivante. L'ouverture inférieure du corps de pompe est un cône évasé par en haut; elle est fermée par un cône solide qui tient à une petite tige de cuivre, laquelle glisse avec un frottement assez fort dans le corps même du piston; en sorte que, si le piston est en bas, au premier mouvement d'élévation le cône solide s'élève et l'ouverture s'ouvre; tandis que, si le piston est en haut, le premier mouvement d'abaissement abaisse le cône solide et ferme l'ouverture.

La machine pneumatique que nous venons de décrire est munie d'un instrument propre à faire reconnaître, dans

tous les momens, le degré d'élasticité ou de tension de l'air contenu dans les récipiens. On lui donne communément le nom d'éprouvette; mais c'est une espèce de baromètre, dont nous ne pourrons concevoir les effets qu'après avoir parlé de l'atmosphère et de sa pesanteur.

L'usage de la machine pneumatique, ou la faculté de diminuer ou de détruire presque complètement la force élastique de l'air qui nous environne sans cesse, et par conséquent les effets de la pression atmosphérique, donne lieu à une foule d'expériences plus ou moins curieuses et qui ont fourni les démonstrations et les découvertes les plus remarquables de la physique moderne. Et pour en citer quelques exemples, on conçoit que de l'air atmosphérique enfermé, sous la pression ordinaire de l'atmosphère, dans une petite fontaine de compression, que l'on placera ensuite sous le récipient d'une machine pneumatique (*fig.* 89) dans lequel on fera le vide, se trouvera posséder une force élastique bien supérieure à celle du peu d'air qui restera dans le récipient, et fera par conséquent jaillir l'eau par le tube vertical, comme s'il eût été précédemment comprimé dans le vase.

Si l'on place sous le récipient de la machine pneumatique une vessie fermée, mais contenant un très petit volume d'air, lorsqu'on viendra à faire le vide, le peu d'air contenu dans la vessie se dilatera à mesure que la compression extérieure diminuera, et la vessie finira par se trouver absolument remplie et tendue.

Dans le premier cas, lorsqu'on laisse rentrer l'air dans le récipient, on voit cet air repasser à travers l'eau dans la partie vide du vase, comme si on l'y poussait avec une pompe de compression; ce qui provient de ce que l'air intérieur avait perdu, en se dilatant, une partie de sa force élastique.

Dans le cas de la vessie, la rentrée de l'air dans la cloche comprime de nouveau celui de la vessie et le réduit au petit volume qu'il occupait précédemment.

Tout ce que nous venons de dire et de démontrer, en prenant l'air atmosphérique pour exemple, s'applique rigoureusement à tous les autres fluides permanens, quelles que puissent être les variétés de leurs densités, et même aux vapeurs; tant qu'elles se trouvent dans les conditions qui peuvent maintenir leur état élastique.

CHAPITRE III.

APPLICATION DES LOIS DE LA MÉCANIQUE A L'ÉQUILIBRE ET AU MOUVEMENT DES FLUIDES ÉLASTIQUES.

232. Si les lois abstraites de la statique et de la dynamique sont, la plupart du temps, inapplicables aux phénomènes d'équilibre et de mouvement que peuvent présenter les corps liquides, la difficulté devient encore plus grande lorsqu'il est question d'apprécier et de calculer ces phénomènes dans les fluides élastiques; car, indépendamment de cette mobilité partielle qui se rencontre dans les uns et dans les autres, la circonstance d'une élasticité parfaite et susceptible d'être mise en jeu par les moindres puissances vient encore compliquer les phénomènes. Aussi, la statique et la dynamique des fluides élastiques se réduisent-elles à un très petit nombre de cas particuliers, dans lesquels il nous sera permis d'analyser les phénomènes et de découvrir les lois qui les régissent. Nous examinerons successivement :

1° L'équilibre d'un fluide élastique contenu dans un vase fermé, ou communiquant avec l'atmosphère;

2° Les pressions que ce fluide élastique exerce sur les parois du vase;

3° La constitution de l'atmosphère;

4° Les pressions qu'elle exerce et leurs variétés;

5° Les méthodes qui servent à mesurer ces pressions;

6° Les machines dont les effets dépendent de la pression atmosphérique;

7° L'équilibre des corps qui flottent dans l'atmosphère:

8° Les mouvemens de masse des fluides élastiques, comprenant les agitations de l'atmosphère, les mouvemens de l'atmosphère produits par des moyens mécaniques, et l'écoulement des fluides élastiques par des orifices;

9° Le choc et la résistance des fluides élastiques;

10° Les vibrations des fluides élastiques.

Pour faciliter et abréger ce que nous avons à dire sur la statique et les mouvemens des fluides élastiques, nous devons faire remarquer que ces sortes de corps, étant doués de pesanteur, et jouissant d'une mobilité parfaite dans leurs particules absolument comme les liquides, doivent être soumis aux mêmes lois, sauf les modifications que la circonstance de l'élasticité peut y apporter.

DE L'ÉQUILIBRE D'UN FLUIDE ÉLASTIQUE CONTENU DANS UN VASE FERMÉ, OU COMMUNIQUANT AVEC L'ATMOSPHÈRE.

233. Étant donné un certain volume d'air, actuellement soumis à la pression ordinaire de l'atmosphère, si l'on suppose cet air enfermé dans un vase quelconque, on pourra dire que ce fluide élastique exerce, de dedans en dehors, sur les parois de ce vase, des pressions parfaitement égales dans tous les sens; mais ces pressions pour-

ront être considérées comme nulles, parce qu'elles se trouveront rigoureusement équilibrées par celles que l'air environnant exerce lui-même sur les parois extérieures du vase; d'où il résulte que la masse supposée serait également en équilibre si les parois du vase disparaissaient tout à coup.

Ce principe explique comment une capacité à parois flexibles, comme une vessie, peut rester flasque et déprimée, quoiqu'elle contienne une certaine quantité de fluide élastique. On conçoit aussi qu'à la moindre diminution des pressions extérieures, le fluide intérieur pourra se distendre et gonfler la vessie, comme cela arrive sous le récipient de la machine pneumatique.

Il est essentiel de remarquer que l'équilibre dont nous venons de parler peut exister également lorsque le vase est rempli de liquide et plongé dans un fluide élastique, ou lorsqu'il est rempli de fluide élastique et plongé dans un liquide; ce qui, comme nous le verrons, explique parfaitement l'état d'indifférence où se trouvent les êtres organisés relativement à l'atmosphère qui les presse ou aux fluides élastiques qu'ils contiennent.

D'après le principe de statique que nous venons d'établir, il est évident qu'un volume d'air, étant enfermé dans un vase, sous la pression ordinaire de l'atmosphère, on pourra faire une ouverture dans un point quelconque du vase, sans que les conditions d'équilibre soient changées. Il faudra seulement remarquer que l'ouverture restant libre, il ne pourra jamais se produire aucune différence sensible entre les forces élastiques intérieures et extérieures. En effet, si l'air intérieur contractait une force élastique plus grande, une certaine quantité de cet air sortirait par l'ouverture, jusqu'à ce que l'équilibre fût rétabli. Il en serait de même si la force élastique extérieure diminuait. S'il

arrivait, au contraire, que la force élastique de l'air intérieur vînt à diminuer, une certaine quantité de l'air extérieur pénétrerait dans la cavité, jusqu'à ce que l'équilibre fût rétabli. Ce dernier effet peut être aisément produit par l'agrandissement de la capacité même d'un vase à parois solides, comme il arrive lorsqu'on élève un piston dans un corps de pompe communiquant avec l'atmosphère. L'air extérieur rentre alors dans la cavité, en produisant un bruit très sensible.

Ces différens phénomènes se produisent alternativement dans la respiration de l'homme. Dans l'état de repos de la poitrine, l'air contenu dans les poumons est en équilibre d'élasticité avec l'air extérieur; mais si, par l'action combinée des muscles inspirateurs, la capacité absolue de la poitrine est augmentée, l'élasticité de l'air contenu tend à diminuer à proportion du plus grand volume qu'il doit occuper, et dès lors l'air extérieur pénètre par l'ouverture de la glotte jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli. Cette rentrée de l'air peut avoir lieu avec bruit, si l'inspiration est rapide. S'il arrive, au contraire, que les muscles expirateurs viennent à diminuer la capacité absolue de la poitrine, l'air contenu tend à prendre, par suite de la compression, un excès de force élastique proportionnelle, et dès lors un certain volume de cet air s'échappe par la même ouverture, en produisant souvent un son dont les différentes modifications constituent la voix ou la parole.

DES PRESSIONS DES FLUIDES ÉLASTIQUES SUR LES PAROIS DES VASES QUI LES CONTIENNENT.

234. D'après ce que nous avons dit sous le numéro précédent, il semblerait que les pressions des fluides élastiques sur les différens points des parois des vases qui les contien-

nent dussent être parfaitement égales; et c'est ce qui résulte, en effet, de l'expérience, dans les vases d'une médiocre capacité. Il faut cependant concevoir que deux circonstances importantes doivent modifier ces effets, lorsqu'il est question de vases d'une grande dimension, et particulièrement d'une très haute colonne de fluide élastique. Ces deux circonstances sont : 1° la pesanteur absolue du fluide, qui, pour être petite et sans effets appréciables dans les petites masses, n'en produit pas moins de très grands effets quand il est question de colonnes très hautes, comme celle que peut représenter une atmosphère de plusieurs lieues d'épaisseur; 2° la compressibilité du fluide élastique, qui, dans une colonne élevée, doit se trouver chargée d'un poids plus considérable vers la base que vers le sommet.

Pour apprécier le mode d'influence de ces deux causes sur les pressions exercées par les fluides élastiques, supposons (*fig.* 90) un vase cylindrique A B d'une très grande hauteur. Si ce vase était rempli d'un corps liquide, les pressions sur les parois latérales seraient, aux différens points de sa hauteur, directement proportionnelles aux distances de ce point jusqu'au niveau supérieur du cylindre, ainsi que nous l'avons démontré en hydrostatique, et en supposant, ce qui est vrai, que l'élasticité des liquides n'apporte aucune différence sensible dans les résultats.

Si le gaz, que nous supposons maintenant remplir le vase A B, était seulement pesant, sans être compressible, il est évident que les parois latérales seraient diversement pressées par la colonne de fluide, suivant la même loi que pour les liquides, et à proportion du peu de poids spécifique que présentent communément les gaz relativement aux autres corps. Mais si ce gaz est à la fois pesant et compressible, comme il est nécessaire que la force élastique

de sa couche inférieure supporte la totalité du poids des couches supérieures, il est évident, d'après la loi de Mariotte, que les couches devront avoir d'autant plus de densité qu'elles seront plus inférieures ou plus comprimées; en sorte que si la hauteur A B est supposée formée d'une série de couches superposées, d'une part, les pressions dans un point quelconque seront proportionnelles au nombre de couches supérieures, et d'autre part, la densité même de chaque couche sera proportionnelle à ce même nombre de couches supérieures; en sorte que les pressions exercées sur la partie inférieure du vase seront en raison composée du nombre des couches superposées et de leurs densités relatives. Ces deux influences varient dans la progression arithmétique du nombre des couches; leur effet combiné doit donc varier en raison composée de ces deux influences; et nous verrons, en effet, en parlant de la pression atmosphérique, qu'elle varie en progression géométrique lorsque les hauteurs sont en progression arithmétique.

On conçoit que des influences de cet ordre n'aient point d'effet sensible dans les vases d'une capacité médiocre; car l'air atmosphérique, par exemple, ayant un poids spécifique environ huit cents fois moindre que celui de l'eau, une colonne d'air d'un pied de hauteur, par exemple, présente sensiblement la même densité à sa base ou à son sommet, attendu que le poids de cette colonne partielle est extrêmement petit relativement à la pression commune que toute cette colonne supporte, pression qui est celle de l'atmosphère, que l'on peut représenter par 32 pieds d'eau. Aussi ne tient-on jamais compte des influences des deux causes dont nous venons de parler dans l'évaluation des pressions exercées par les gaz, à moins qu'il ne soit question de la totalité de la colonne atmosphérique ou d'une

grande partie de sa hauteur. (*Voy.* l'article *Pression de l'atmosphère.*)

DE LA CONSTITUTION DE L'ATMOSPHÈRE.

235. Le mot *atmosphère* est tiré de deux mots grecs qui signifient *sphère de vapeur.* On donne, en effet, ce nom à une sorte d'enveloppe de fluides élastiques qui environnent de toutes parts le globe terrestre, qui nous paraît avoir une très grande hauteur, mais qui, dans le fait, doit être considérée comme une couche très mince, appliquée à la surface du globe, puisque l'épaisseur de cette couche n'excède pas beaucoup la 300ᵉ partie du diamètre de la terre. Les fluides élastiques qui composent l'atmosphère étant pesans, il est naturel qu'ils soient répandus à peu près uniformément autour de la terre; et cette couche même doit suivre tous les mouvemens du globe, à peu près comme la couche de liquide qui adhère autour d'une bille qu'on a plongée dans l'eau.

L'atmosphère est ordinairement transparente et sans couleur pour les petites masses; mais en grand volume elle présente une couleur bleue qui paraît dépendre de la quantité d'eau qu'elle contient. Cette couleur bleue forme la nuance de ce que nous appelons le ciel, et qui n'est en réalité que l'espace indéfini, qui nous paraîtrait tout à fait noir si nous ne lui attribuions faussement la lumière bleue qui nous est transmise par l'atmosphère.

L'atmosphère jouit, du reste, de toutes les propriétés que nous avons reconnues aux fluides élastiques; mais il est important de remarquer qu'elle en contient de diverses espèces. L'oxigène et l'azote, par le mélange de 0,21 du premier et de 0,79 du second, forment la masse principale de cette atmosphère et constituent ce qu'on a nommé

plus particulièrement air atmosphérique. Le gaz acide carbonique s'y trouve mêlé dans les proportions variables de 0,01 à 0,005. On y rencontre constamment une certaine quantité de vapeurs d'eau, qui varie de 0,0166 à 0,0033 de son volume; en sorte qu'elle contient, terme moyen, 0,0142 de son poids d'eau en vapeur. Enfin, elle doit nécessairement contenir une certaine quantité de tous les corps susceptibles de se réduire en vapeurs et qui s'y trouvent plongés. Cette proposition peut même, à la rigueur, s'étendre à tous les corps, puisque les plus fixes paraissent susceptibles d'un certain degré de volatilisation à toutes les températures.

Indépendamment de ces différentes parties constituantes, il est certain que l'atmosphère contient des quantités variables de calorique, et que ses différentes parties peuvent aussi se trouver dans des états électriques divers.

Toutes les parties constituantes variables de l'atmosphère peuvent faire varier aussi ses propriétés physiques; mais l'histoire de l'influence de ces causes appartient à d'autres articles de ce traité; on les trouvera au livre du *Calorique*, à celui de l'*Électricité* et au chapitre des *Vapeurs*, où nous donnerons les notions nécessaires sur ce qu'on nomme la *Météorologie*. Nous nous contenterons ici de rechercher la densité de l'atmosphère, qui est une conséquence de son poids.

DU POIDS DE L'ATMOSPHÈRE.

236. On a long-temps ignoré l'existence du poids de l'atmosphère qui nous environne; on sait maintenant que c'est ce poids qui élève l'eau dans une pompe aspirante; mais on disait avant Galilée que cette élévation tenait à ce que la nature avait horreur du vide. Des pompiers de

Florence ayant construit une pompe qui avait plus de trente-deux pieds au dessous du piston, furent surpris de voir que l'eau ne s'élevait pas au delà d'un certain terme; ils en demandèrent la raison à Galilée, qui leur répondit qu'apparemment la nature n'avait horreur du vide que jusqu'à cette hauteur : cependant ce fait l'éclaira; il découvrit la pesanteur de l'air, et son disciple Toricelli inventa le baromètre.

Aujourd'hui que les méthodes scientifiques sont plus exactes et les lois générales mieux connues, on pourrait conclure *à priori* que l'atmosphère est pesante, puisqu'il est impossible qu'une masse de fluides élastiques environnant le globe terrestre ne soit pas attirée par son centre comme toute autre matière; mais on démontre ce poids par une foule d'expériences physiques, dont nous citerons quelques unes.

Si l'on place une cloche de cristal sur le plateau de la machine pneumatique, on pourra soulever aisément cette cloche, car l'élasticité de l'air intérieur fait précisément équilibre au poids qui presse sur sa partie supérieure; mais si l'on vient à enlever, par le mécanisme que nous avons indiqué, l'air contenu dans la cloche, ou à y faire le vide, on ne peut plus la soulever sans employer une force énorme, parce que le poids de l'atmosphère la presse sans qu'aucune puissance lui fasse équilibre, et si la cloche n'était pas épaisse et solide elle serait écrasée par le poids.

Si l'on prend une espèce de manchon de cristal (*fig.* 91) fermé en haut par une vessie tendue, on sait que, dans l'état ordinaire, cette vessie reste plane comme si elle n'éprouvait aucune pression; mais si l'on fait le vide dans le vase, dès les premiers coups de piston la vessie devient concave; et, quand le vide est complet, si on frappe la

vessie, elle se crève avec un grand bruit. Ces effets ne sauraient être attribués qu'au poids de l'atmosphère.

On conçoit que si l'atmosphère est pesante, son poids doit se faire sentir également dans tous les sens, d'après les lois de la statique des fluides : c'est ce qui arrive en effet.

Si l'on prend un tube d'au moins un mètre de hauteur, fermé par un bout et ouvert par l'autre; si l'on pratique une petite ouverture latérale à ce tube et qu'on la bouche avec une vessie fortement liée autour du tube; le tube étant ainsi préparé, si on le remplit de mercure et qu'on le renverse dans un vase rempli de ce métal, on observera que le mercure descendra dans le tube d'une certaine quantité qui laissera un espace vide dans le haut du tube, mais que le mercure se maintiendra dans le tube à une hauteur d'environ 28 pouces ou $0^{m},76$ au dessus du niveau du vase. Cet appareil est ce qu'on nomme le tube de Toricelli.

Si l'on recherche quelle peut être la cause qui maintient le mercure à cette hauteur dans l'intérieur du tube, on trouve que toute la surface du mercure contenu dans le vase est soumise à la pression atmosphérique, excepté la petite surface circulaire qui répond à l'intérieur du tube, qui, évidemment, ne saurait éprouver cette pression, puisque la partie supérieure de ce tube est entièrement vide; ce dont il est facile de s'assurer, car, en inclinant ce tube, le mercure va frapper son sommet. D'après les principes que nous avons établis (194) sur l'équilibre de la surface libre des liquides, il devient nécessaire qu'une certaine colonne de mercure s'élève dans l'intérieur du tube pour remplacer la pression atmosphérique qui manque en ce point. Nous verrons, en effet, dans l'article suivant, que la hauteur de cette colonne est, dans le baromètre, la mesure exacte du poids de l'atmosphère.

Lorsque la colonne de mercure est ainsi élevée dans le tube que nous avons décrit, si l'on perce avec une pointe la vessie qui ferme l'ouverture latérale, à l'instant même la colonne de mercure se divise en deux parties dans le point qui correspond à la piqûre ; la portion inférieure descend rapidement, et la portion supérieure s'élève et va frapper le sommet du tube. Cette expérience remarquable prouve à la fois que l'atmosphère exerce sa pression latéralement, de haut en bas et de bas en haut.

On arrive plus simplement encore à la même preuve en faisant le vide sous un récipient qui a des ouvertures munies de robinets dans différentes directions ; car, quel que soit le robinet qu'on ouvre après avoir fait le vide, l'air rentre également dans l'intérieur du récipient.

Enfin nous citerons, pour dernière expérience, les hémisphères de Magdebourg, qui consistent, comme leur nom l'indique, en deux demi-sphères de cuivre qui se joignent exactement par leur bord, et dans lesquelles on peut faire le vide en les montant à vis sur la machine pneumatique, et fermant ensuite le robinet de communication. On trouve qu'après avoir enlevé l'air de l'intérieur de la cavité formée par la réunion de deux hémisphères, il faut employer une très grande force pour les séparer l'une de l'autre, ce qui ne saurait dépendre que de la pression que l'atmosphère exerce autour d'elles dans toutes les directions.

DES MÉTHODES QUI SERVENT A MESURER LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE.

237. Nous avons vu, sous le numéro précédent, que le mercure était soutenu dans le tube de Toricelli à une certaine hauteur, par l'effet de la pression que l'atmosphère exerce à la surface du liquide extérieur au tube. On ob-

tiendra le même résultat avec tout autre liquide que le mercure, seulement la colonne devrait être d'autant plus haute que le liquide aurait un poids spécifique moindre; et c'est ce que l'expérience confirme très rigoureusement. On ne peut pas remplir un tube suffisamment long avec de l'eau, et le renverser ensuite comme on fait pour le mercure; mais on peut, à l'aide des mouvemens alternatifs d'un piston semblable à celui que nous avons décrit (234), faire le vide dans un tube vertical très long, dont l'extrémité inférieure plonge dans l'eau; et l'on observe alors que ce liquide s'élève dans le tube jusqu'à environ 32 pieds ou 384 pouces de hauteur; et si l'on compare cette élévation avec celle de la colonne de mercure, qui est d'environ 28 pouces, on trouve que ces deux hauteurs sont entre elles dans le rapport de 13, 5 à 1, c'est-à-dire précisément en raison inverse des poids spécifiques du mercure et de l'eau. Cette comparaison et toutes celles du même genre qu'il serait facile de faire, prouvent non seulement que le poids de l'atmosphère est cause de l'élévation du mercure dans le tube de Toricelli; mais encore que la hauteur de cette colonne est une expression exacte de la valeur de ce poids.

Toricelli ayant découvert, en 1643; l'instrument qui porte son nom, Pascal s'assura qu'en effet c'était le poids de l'air qui soutenait cette colonne de mercure, en faisant porter un de ces tubes au sommet du Puy-de-Dôme, pendant qu'il en observait un autre au bas de cette montagne. En effet, la colonne de mercure devait descendre à mesure qu'on s'élevait dans l'atmosphère; c'est ce qui a été pleinement confirmé.

D'après ces données positives, le tube de Toricelli a dû devenir la mesure de la pression atmosphérique, et on lui a donné le nom de *baromètre*.

L'usage et les diverses applications du baromètre ont amené de grandes variétés dans le mode de sa construction. Nous nous contenterons d'en décrire trois principales, savoir : le baromètre à cuvette, le baromètre à siphon simple, et le baromètre de voyage de M. Gay-Lussac.

Lorsque nous avons parlé de la manière d'établir le tube de Toricelli, nous n'avons indiqué aucune précaution préliminaire. Cependant il en est un certain nombre qui sont indispensables et applicables à tous les genres de baromètres.

Le tube de verre dont on a fait choix doit avoir au moins cinq ou six millimètres de diamètre ; il doit être assez épais pour résister au poids et même au choc du mercure. Après l'avoir fermé à l'une de ses extrémités, il est bon, surtout pour les baromètres portatifs, de le resserrer fortement à deux ou trois centimètres de son extrémité fermée, afin d'éviter le choc subit du mercure à sa partie supérieure, quand on incline le baromètre. Le mercure dont on fait usage doit être parfaitement pur ; et, pour en être certain, il est bon de le distiller préliminairement dans un vase de fer. Ces précautions prises, on peut remplir le tube de mercure ; mais il faut remarquer qu'une surface vitreuse exposée à l'air retient constamment une petite couche d'eau et d'air, et que, d'une autre part, le mercure lui-même tient toujours en dissolution une certaine quantité de ces deux corps ; en sorte que, si l'on se contentait de remplir le tube de mercure et de le renverser, une petite quantité d'air s'éleverait dans la partie vide du baromètre et y exercerait une certaine pression qui diminuerait sa hauteur ; et que, d'une autre part, une certaine quantité d'eau se réduirait en vapeur dans ce même vide et y exercerait aussi une pression relative qui aurait le même inconvénient ; en un mot, que la partie supérieure du tube ne serait pas

réellement vide, ce qui est la condition indispensable de l'exactitude de l'instrument. Pour obvier à ces inconvéniens, on doit faire bouillir pendant long-temps et par portion, en commençant par le haut, le mercure dans le tube même; ce qui suffit pour chasser complètement l'air et l'eau qui peuvent y être contenus. Cette opération terminée et le mercure refroidi, le tube étant bouché, on peut procéder à l'établissement du baromètre.

Si l'on veut obtenir un baromètre à cuvette, il suffira de renverser le tube parfaitement plein de mercure, après l'avoir fermé avec le doigt sans y laisser aucune bulle d'air, dans un vase contenant du mercure bouilli et aussi pur que celui du tube. On peut donner à ce vase une forme semblable à celle indiquée (*fig.* 92), en sorte que le tube descende dans une espèce de prolongement rétréci, que l'entrée soit étroite pour la fermer avec une peau de chamois qui permettra l'accès de l'air sans laisser passer le mercure, et de façon pourtant que le niveau du liquide dans cette cuvette présente une surface d'une très grande étendue. Il ne restera plus qu'à fixer le baromètre sur un appui solide, et à trouver le moyen de mesurer exactement la hauteur de la colonne.

Il est évident que l'expression du poids de l'atmosphère est la différence du niveau entre la surface de mercure dans le tube et celle du mercure dans la cuvette; mais il faut remarquer que cette dernière surface étant très grande, par exemple, sept à huit cents fois celle du mercure dans le tube, si le mercure descend dans ce tube d'un millimètre, il ne s'élevera dans la cuvette que de la sept à huit centième partie d'un millimètre, quantité qui peut être négligée dans toutes les circonstances ordinaires; en sorte qu'on pourra prendre pour point de départ le niveau réel de la cuvette à une hauteur moyenne du baromètre, et tracer à côté du

tube une échelle divisée en pouces et en lignes, ou en fractions de mètre, et qui s'élève au dessus des plus grandes hauteurs ordinaires du baromètre; et comme ces variations d'élévation ou d'abaissement sont en général très limitées, après avoir tracé cette échelle, on pourra supprimer toute sa partie inférieure et n'en conserver qu'une petite portion, située comme dans la *fig.* 92.

On trace ordinairement cette portion d'échelle sur une plaque de cuivre argentée, et, pour avoir des divisions assez petites, on y adapte un Nonius, qui donne aisément; à la vue simple, des dixièmes de millimètre. Ce Nonius est lui-même armé d'un petit arc en cuivre qui passe devant le tube barométrique, et qui doit répondre précisément au sommet de la courbe convexe que forme le mercure dans l'intérieur du tube.

Le baromètre à siphon (*fig.* 93) est fondé sur les mêmes principes : sa construction exige les mêmes précautions: mais on le prépare avec un tube recourbé, comme on le voit dans la figure, en sorte qu'il présente deux colonnes de mercure qui se font équilibre malgré leur différence de hauteur, attendu que l'une des deux seulement est chargée du poids de l'atmosphère. On conçoit que la différence des hauteurs de ces colonnes est ici l'expression du poids de l'atmosphère, et que l'une des deux s'élève toujours autant que l'autre s'abaisse, pourvu que le diamètre du tube soit le même aux extrémités des deux colonnes. On pourra donc, si l'on a pris cette précaution, se contenter de mesurer les changemens de niveau de l'une des colonnes, en doublant les différences obtenues. Si les deux tubes n'ont pas le même diamètre, il faudra mesurer séparément l'abaissement de l'une des colonnes et l'élévation de l'autre. Le baromètre à siphon est susceptible d'une exactitude rigoureuse dans l'une ou l'autre de ces manières de l'observer;

mais il lui reste un inconvénient très grave qu'il partage avec le baromètre à cuvette, savoir, la difficulté de le transporter. En effet, d'une part, au moindre mouvement d'inclinaison, la colonne de mercure va frapper avec force le sommet du tube et peut le briser malgré le rétrécissement que nous avons indiqué; d'une autre part, le mercure contenu dans la courte branche du siphon ou dans la cuvette peut se renverser, et l'air parvenir dans l'intérieur du tube.

M. Fortin a perfectionné le baromètre à cuvette en le rendant portatif et à niveau constant; sa méthode consiste à renfermer le tube du baromètre dans une enveloppe de cuivre fendue longitudinalement pour laisser voir le mercure, et à employer une cuvette cylindrique dont le fond peut s'élever et s'abaisser, comme un piston, par une vis de pression. Une pointe d'ivoire placée dans l'intérieur de cette cuvette indique le niveau; et en tournant convenablement la vis, on réussit toujours à faire toucher la surface de mercure à cette pointe. Du reste, quand on élève suffisamment le fond de la cuvette, on chasse tout l'air qu'elle contient à travers la peau de chamois qui la recouvre, et même on force le mercure à monter jusqu'au sommet du tube barométrique, ce qui rend l'instrument parfaitement transportable.

Les baromètres de M. Fortin sont munis d'un Nonius et présentent deux petits plans horizontaux, situés devant et derrière la colonne de mercure, et qui se meuvent avec le nonius, de manière à faire apprécier très exactement la situation de la partie supérieure du mercure. Cet instrument est d'ailleurs suspendu de manière à prendre une situation parfaitement verticale, à l'aide d'un trépied dont les branches peuvent se réunir et lui former un étui solide.

M. Gay-Lussac a imaginé un baromètre à siphon simple,

économique, portatif et très exact. Le tube de ce baromètre est représenté (*fig.* 94). La partie A et la partie B proviennent d'un même tube exactement cylindrique ; la portion C est un tube plus étroit soudé entre ces deux portions, et qui, à sa partie inférieure, est tout à fait capillaire : lorsque le baromètre est construit à la manière ordinaire, on ferme à la lampe sa courte branche, et l'on pratique au point D une petite ouverture capillaire qui permet bien la pression atmosphérique, mais qui ne laisse pas sortir le mercure. Lorsque cet instrument est renversé, le mercure repose sur l'extrémité de la longue branche, et la capillarité de la portion C empêche que le mercure s'en échappe et que l'air y rentre, même dans des secousses. On peut placer ce baromètre dans une canne, et il suffit d'observer les mouvemens de l'une des deux colonnes, en doublant la valeur, puisque leurs diamètres sont égaux.

Tous les baromètres doivent être accompagnés d'un thermomètre situé très près de la colonne barométrique et qui puisse indiquer sa température ; et en outre, il est le plus souvent nécessaire d'en avoir un autre, séparé de l'instrument, pour connaître la température de l'air, qui n'est pas toujours celle du baromètre.

Les instrumens que nous venons de décrire, avec quelque soin qu'on les ait construits, présentent encore deux causes d'erreur, qui sont inhérentes à leur nature et qu'il est nécessaire de rectifier. La première est déterminée par des changemens de température qui, en dilatant ou condensant le mercure, rendent la colonne plus haute ou plus basse, pour une même pression, puisque cette hauteur est, comme nous l'avons dit, en raison inverse de la densité des liquides. On est convenu de rapporter tous les résultats de l'expérience au 0° température. Lorsqu'elles sont faites à d'autres degrés, il est nécessaire de rectifier les résultats,

ce qui est facile, puisqu'on sait que le mercure se dilate, pour 1° du thermomètre, de $\frac{1}{5550}$ de son volume, et qu'il est évident qu'un cylindre dont le diamètre est fixe doit s'accroître en longueur de toute cette dilatation, c'est-à-dire de $\frac{1}{5550}$. Il suffira donc de diminuer ou d'augmenter la longueur de la colonne trouvée par expérience de $\frac{1}{5550}$ de sa longueur totale par chaque degré de température au dessous ou au dessus de zéro.

La seconde cause d'erreur tient à l'action capillaire qui abaisse toujours le mercure d'une quantité notable, à moins que le tube ne se trouve d'un diamètre très considérable qui rendrait l'instrument fort incommode.

Les baromètres à siphon, dont les branches sont d'un égal diamètre, comme celui de M. Gay-Lussac, ont l'avantage de corriger spontanément cette erreur, puisque la dépression capillaire est précisément la même dans les deux tubes, et se compense exactement. Quant aux autres baromètres, on peut rectifier les résultats d'après la table suivante :

DIAMÈTRE INTÉRIEUR EN MILLIMÈTRES.	DÉPRESSION EN MILLIMÈTRES.	DIAMÈTRE INTÉRIEUR EN MILLIMÈTRES.	DÉPRESSION EN MILLIMÈTRES.
2	4,5599	11	0,3506
3	2,9023	12	0,2602
4	2,0388	13	0,2447
5	1,5053	14	0,1597
6	1,1482	15	0,1245
7	0,8813	16	0,0970
8	0,6851	17	8,0754
9	0,5354	18	0,0586
10	0,4201	19	0,0430
		20	0,0083

Après avoir décrit tous les baromètres d'une construction exacte et d'un usage scientifique, nous croyons devoir

donner une idée d'un instrument très répandu sous le nom de baromètre à cadran. Il est formé principalement d'un véritable baromètre à siphon (*fig.* 95); mais au dessus de la courte branche se trouve une petite poulie très mobile, sur laquelle passe un fil qui en fait deux fois le tour : l'une des extrémités de ce fil est attachée à un flotteur qui repose sur le mercure, et l'autre porte un petit contre-poids qui sert à tendre le fil et à détruire une grande partie du poids du flotteur; la petite poulie conduit une grande aiguille très légère, qui se meut sur un vaste cadran où l'on marque soit les hauteurs du baromètre, soit les autres indications dont on les accompagne communément. On conçoit que le mercure ne saurait monter ou descendre dans le baromètre sans que la petite poulie se meuve et fasse changer l'aiguille de place. Cet instrument serait même avantageux sous le rapport de sa grande sensibilité, si l'influence des frottemens et le poids variable de l'aiguille dans ses différentes situations ne le rendaient inexact.

238. *Variations de la pression atmosphérique.* — Lorsqu'on observe pendant long-temps un baromètre situé dans un lieu quelconque, on voit sa hauteur varier presque continuellement. Peu après l'invention de cette importante machine, on pensait que son élévation indiquait la pluie et son abaissement le beau temps, et l'on en donnait pour raison que dans les temps de pluie l'air était chargé d'eau qui devait le rendre plus pesant : on sait maintenant qu'au contraire, le baromètre est, en général, plus élevé quand le temps est serein, ou quand il doit le devenir, et qu'il baisse presque toujours un peu avant la pluie, les orages et surtout les ouragans. On a voulu expliquer ce phénomène par le fait que la vapeur d'eau est à peu près moitié plus légère que l'air atmosphérique; mais cette explication ne vaut pas mieux que la première, car en été, par

un temps serein, l'air contient beaucoup plus d'eau en vapeur que dans beaucoup d'autres circonstances. Quoi qu'il en soit, les indications *beau, très beau, pluie, pluie ou vent, tempêtes, etc.*, que l'on a coutume d'ajouter aux échelles barométriques, se vérifient le plus souvent, mais ne doivent pas être considérées comme constamment vraies.

Les variations du baromètre sont presque nulles sur les hautes montagnes et entre les tropiques; elles sont constantes, mais très peu considérables dans les zones tempérées, dans les temps calmes; mais le baromètre baisse subitement, d'une grande quantité, aux approches des tempêtes, et se livre à de grandes oscillations pendant leur durée, ce qui en fait un instrument précieux à la mer. Ces observations rendent probable que les variations du baromètre dépendent principalement des grandes agitations atmosphériques.

On dresse des tables géométriques des variations du baromètre, en portant chaque jour ces variations sur une suite de lignes perpendiculaires à une ligne droite qui indique la hauteur moyenne. Il résulte de cette série de points une ligne courbe sinueuse, qui se trouve tantôt au dessus, tantôt au dessous de la ligne droite. On a trouvé, par ce moyen, que la hauteur moyenne du baromètre, au bord de l'Océan et à 12°,8 de température, était de $0^m,7629$, tandis qu'à Paris, au niveau de la Seine, elle est de $0^m,7600$ et varie entre $0^m,7669$ et $0^m,7196$, la température moyenne s'y trouvant de 12°.

Les variations barométriques paraissent à peu près simultanées, même dans des lieux très éloignés, comme Paris, Londres et Genève.

Ce qu'il y a de plus remarquable dans les variations barométriques, pour un même lieu, c'est qu'elles ont une sorte de périodicité telle, que le maximum de la hauteur

est à 9 h. du matin, le minimum à 4 h. du soir, et que le maximum reparaît de nouveau à 11 h. Cette marche est souvent troublée dans nos contrées, mais elle est constante entre les tropiques.

Un baromètre élevé à différentes hauteurs dans l'atmosphère, s'abaisse d'autant plus qu'on s'est élevé davantage; et, par exemple, sur le Grand-St-Bernard, la colonne de mercure n'est que de $0^m,57$, lorsqu'elle est $0^m,76$ au niveau de la mer. Si cette expérience se fait sur des hauteurs médiocres, on trouve que l'abaissement du mercure dans le baromètre est de 1^{mm} pour $10^m,5$ de hauteur, ce qui suppose, d'après les principes que nous avons établis, qu'un cylindre de mercure de 1^{mm} pèse autant qu'un cylindre d'air de même diamètre et de $10^m,5$, puisque c'est précisément ce cylindre d'air qui est retranché de la colonne atmosphérique quand on s'est élevé de cette hauteur. Cette proposition est tout à fait conforme à l'expérience directe qui constate les poids spécifiques, car on trouve que le mercure est précisément 10500 fois plus lourd que l'air.

La loi simple que nous venons d'énoncer, et qui est sensiblement vraie pour de petites élévations, ne se confirme plus quand on s'élève à de grandes hauteurs; et l'on trouve qu'un abaissement de 1^{mm} correspond à une élévation plus considérable que 10,5, ce qui dépend du décroissement de densité de l'atmosphère à mesure qu'on s'élève : ce décroissement est tel, que, sur les très hautes montagnes ou dans les grandes ascensions aérostatiques, on a peine à entretenir du feu; le son perd une grande partie de son intensité; toutes les fonctions de l'homme sont troublées, au point de produire les accidens les plus graves.

A l'aide d'un certain nombre d'observations barométriques très exactes, et faites dans des stations dont les hauteurs avaient été précédemment déterminées avec exacti-

tude par d'autres moyens, De Laplace est parvenu à établir une formule, à l'aide de laquelle on peut déduire très approximativement l'élévation d'un lieu quelconque, de la hauteur à laquelle s'y tient le mercure dans le baromètre, pourvu qu'on ait observé en même temps cette hauteur dans un autre lieu voisin et dont l'élévation soit connue. On peut voir, dans le grand Traité de *Physique* de M. Biot, cette formule, dans laquelle il a fallu faire entrer un grand nombre de considérations, et par exemple les influences de la température sur la colonne atmosphérique elle-même, qui sont fort difficiles à apprécier et laissent toujours plus ou moins d'incertitude.

On peut faire usage en général de la formule suivante : $z = 18393 \text{ Log. } \frac{H_0}{Hz}$, dans laquelle z est la hauteur cherchée, 18393 un nombre déterminé par la moyenne de beaucoup d'observations, H_0 la hauteur barométrique dans le point de comparaison, et Hz la hauteur barométrique observée.

Avec les tables d'Oltmanns qui se trouvent dans l'*Annuaire du bureau des longitudes*, on peut trouver la hauteur sans logarithmes.

Connaissant la valeur de la pression atmosphérique évaluée par une hauteur de colonne de mercure de $0^m,76$, il n'est pas impossible de se faire une idée du poids total de l'atmosphère. En effet, ce poids doit être égal à celui d'une couche de mercure qui envelopperait le globe et qui aurait $0^m,76$ d'épaisseur. On peut calculer le poids d'une sphère de mercure qui aurait le rayon de la terre plus $0^m,76$, et en en retranchant le poids d'une sphère de mercure qui aurait précisément le rayon de la terre, sachant, du reste, qu'un décimètre cube de mercure pèse environ 13 kil. 5, on trouve que le poids total de l'atmosphère

doit être de 86,594,456,004,795,636 myriagrammes. L'énormité de cette masse permet de concevoir l'étendue des vastes phénomènes que présente cette atmosphère, et l'influence qu'elle exerce sur tous ceux qui se passent dans la nature.

On peut aussi déterminer aisément, par des méthodes analogues, quelle est la pression que l'atmosphère exerce sur une surface d'une étendue déterminée; car cette pression doit être égale au poids d'une colonne de mercure qui aurait pour base la surface en question, et pour hauteur $0^{m},76$. C'est ainsi qu'on a trouvé que la surface du corps d'un homme de taille moyenne était pressée d'un poids de 16,000 kilogram. environ. Cette grande pression peut paraître extraordinaire; et, ce qui l'est bien davantage, c'est qu'il existe des poissons qui habitent à trois ou quatre mille pieds de profondeur dans le sein des mers. Or, trente-deux pieds d'eau équivalent à la pression de l'atmosphère; il s'ensuit que ces poissons éprouvent une pression trente ou quarante fois plus considérable que celle à laquelle nous sommes soumis, quoique ces animaux exécutent facilement leurs fonctions et se meuvent avec la plus grande agilité sous cet énorme poids. On cessera de s'étonner que non seulement l'homme, mais même les êtres les plus délicats dans leur structure, puissent supporter de semblables efforts sans inconvénient et même sans en avoir aucune conscience, si l'on considère que cette pression s'exerce également dans tous les sens, et qu'elle a lieu en vertu des lois de la statique avec une égalité parfaite de dedans en dehors comme de dehors en dedans; en sorte qu'il n'y a pas une pellicule de notre organisation qui ne soit également pressée sur ses deux faces.

Pour concevoir cette égalité de pression intérieure et extérieure, il est essentiel de se rappeler que les êtres or-

ganisés sont formés de liquides circulant dans des vaisseaux ; qu'ils contiennent dans leur intérieur des fluides élastiques, soit à l'état de liberté, comme dans les poumons, soit à l'état de dissolution, comme dans le sang ; et que, d'une autre part, le ressort des fluides élastiques est déterminé par la pression atmosphérique et lui est par conséquent précisément égal, tandis que les liquides sont sensiblement incompressibles; d'où il suit que la résistance intérieure qui compense les pressions externes peut être considérée comme infinie quand elle dépend d'un liquide, et doit être nécessairement égale à la pression atmosphérique quand elle dépend d'un gaz.

Ce qui achève de prouver, sans réplique, que la réciprocité et l'égalité des pressions est la seule cause qui les rend insensibles aux animaux, c'est que les moindres variétés qui surviennent dans le degré de la pression atmosphérique modifient toutes leurs fonctions d'une manière très sensible. Si le baromètre s'élève, toutes les fonctions s'exécutent avec plus d'énergie ; l'homme et les animaux éprouvent un sentiment d'hilarité et d'aptitude à tous les mouvemens. On conçoit, en effet, que la pression extérieure étant accrue, le ressort des parois membraneuses est favorisé par cet excès de pression, et que les fluides circulans se trouvent mus avec plus de facilité et plus de vitesse, ce qui entraîne une plus prompte et plus complète exécution de toutes les fonctions qui sont influencées par la circulation. S'il arrive, au contraire, que le baromètre baisse d'une quantité un peu considérable, nous éprouvons un sentiment de gêne et de fatigue, une propension au repos, qui se conçoit parfaitement quand on considère que tous nos liquides tiennent quelques gaz en dissolution et tendent, d'ailleurs, à se vaporiser par la température propre du corps ; en sorte que la pression extérieure diminuant,

ces liquides se dilatent plus ou moins et distendent leurs vaisseaux, ce qui doit gêner et ralentir tous les genres de circulation; comme il arrive dans ce qu'on nomme la *pléthore*, quelle que soit la cause qui la produise. Le ralentissement des fonctions, qui est la suite de ce trouble, nous rend plus pénible la tâche de supporter et de mouvoir les différentes parties du corps; et rapportant alors à l'air qui nous environne le sentiment produit dans nos organes mêmes, nous avons coutume de dire, par une singulière opposition, que l'air est *lourd* précisément parce qu'il est trop léger.

Lorsque la diminution de la pression atmosphérique devient accidentellement très considérable, comme il arrive sur les hautes montagnes ou dans les voyages aériens, le trouble qui en résulte dans nos fonctions devient beaucoup plus marqué et s'annonce par de nouveaux symptômes. Le sang que le cœur continue à pousser dans les artères ne trouve plus à l'extrémité des vaisseaux des membranes muqueuses une résistance suffisante; il s'en échappe et produit des hémorrhagies. La respiration elle-même devient laborieuse et pénible par la nécessité d'introduire dans le poumon un plus grand volume d'air, qui puisse compenser la diminution de sa densité et fournir la proportion d'oxigène nécessaire à l'entretien de la vie. Il y a même des limites assez bornées à la faculté que possède l'homme de supporter de moindres pressions, et cette seule cause suffirait pour l'empêcher de s'élever à de très grandes hauteurs dans l'atmosphère, puisqu'on voit les animaux du même ordre périr promptement, et dans un état de tuméfaction extraordinaire, sous le récipient d'une machine pneumatique où l'on fait le vide.

Les expériences barométriques et les lois de la statique des fluides aériformes nous ayant démontré que la densité

de l'atmosphère doit aller en décroissant, et même dans une progression plus rapide que celle des hauteurs, il en résulte qu'il doit exister une certaine distance de la surface de la terre où il n'y ait plus d'air : ce point doit se trouver dans l'endroit où la force de répulsion qui anime les molécules des gaz se trouve précisément en équilibre avec la force de pesanteur qui tend à rapprocher ces molécules du centre de la terre; et ce point doit être d'autant moins éloigné du globe que la température va toujours en s'abaissant à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère, ce qui doit concourir à diminuer la force de répulsion. On ne peut pas calculer exactement, d'après ces données, la véritable élévation de l'atmosphère; mais De Laplace a trouvé qu'à douze lieues de hauteur l'air devait être aussi rare que sous le récipient de la machine pneumatique où l'on a fait le vide le plus exactement possible.

Une des applications importantes du baromètre, que nous ne saurions passer sous silence, c'est l'emploi qu'on en a fait pour déterminer la force élastique des gaz sous des pressions moindres que celle de l'atmosphère, et, par exemple, pour constater le vide produit par la machine pneumatique.

Si l'on dispose, comme dans la *fig.* 96, un baromètre à siphon, de manière que sa courte branche soit comprise sous une cloche de cristal, tant que cette cloche communiquera avec l'atmosphère, on pourra dire que c'est le poids de l'atmosphère qui presse au point A par l'intermède du fluide élastique; et si l'on pose la cloche sur le plateau de la machine pneumatique, il n'y aura plus que la force élastique de l'air contenu qui puisse presser sur le mercure : l'effet restera le même, d'après les principes que nous avons établis. Mais si, par le jeu de la machine, on enlève une portion de l'air contenu dans la cloche, la pression au

point A diminuera dans la même proportion; la même colonne de mercure ne pourra plus être soutenue par cette pression, et le mercure descendra dans la longue branche du baromètre. On conçoit même que, si l'on pouvait faire sous la cloche un vide aussi complet que celui qui existe dans le haut du baromètre, le mercure devrait se trouver au même niveau dans les deux branches, puisqu'il n'éprouve aucune pression ni d'un côté ni de l'autre. Il est impossible d'arriver à cette perfection avec les meilleures machines; mais on en approche à 1^{mm} près, c'est-à-dire que le ressort de l'air qui reste dans la cloche est capable de soutenir une colonne de mercure d'un millim. de hauteur, tandis que le ressort de l'air pressé par l'atmosphère peut soutenir une colonne de $0^{m},760$: d'où il résulte qu'il ne reste dans la cloche que $\frac{1}{760}$ de l'air qui y était contenu d'abord. On voit que cette méthode non seulement donne la mesure de la force élastique, mais encore donne exactement la quantité d'air qui reste après un vide quelconque.

Comme on n'a ordinairement besoin d'apprécier le vide de la machine pneumatique que lorsqu'il est déjà très avancé, on adapte à la machine pneumatique une espèce de baromètre raccourci qu'on nomme *éprouvette*, et qui est représenté *fig.* 99. Sous la pression ordinaire de l'atmosphère, le mercure touche et presse même l'extrémité supérieure de la longue branche; mais lorsque le vide est assez avancé, le mercure commence à descendre et s'approche de plus en plus du niveau entre les deux branches, qui est marqué par un zéro. Ce petit instrument est enfermé dans une cloche particulière, qui communique par un robinet avec l'intérieur de la machine pneumatique.

DE QUELQUES MACHINES DONT LES EFFETS DÉPENDENT DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE.

239. *Des Pompes.* Les pompes sont des instrumens à l'aide desquels on élève l'eau à des hauteurs plus ou moins considérables, en vertu d'une puissance mécanique quelconque et suivant des principes divers. Il s'en faut de beaucoup que toutes les pompes tirent leur effet de la pression atmosphérique : mais nous avons cru devoir réunir leur histoire sous un seul point de vue.

La plus simple des pompes porte le nom de pompe foulante. Son action dépend de la pression qu'on exerce sur le liquide au moyen d'un piston. Son mécanisme est représenté dans la *fig.* 100. Le piston M est contenu dans un corps de pompe qui est entièrement plongé dans l'eau ; ce piston est muni d'une soupape m' en forme de clapet, qui s'ouvre quand le piston monte, et qui se ferme quand il descend. Ce corps de pompe communique avec un tuyau latéral ascendant muni d'une autre soupape m, qui s'ouvre quand le liquide monte, et qui se ferme quand il tend à descendre. Cela posé, et tout l'appareil étant plein d'eau, si l'on abaisse le piston M, la soupape m' se fermera, et l'eau étant incompressible ouvrira la soupape m et s'élevera dans le tuyau ascendant. Si le piston remonte, la soupape m se fermera et empêchera l'eau déjà élevée de redescendre ; mais la soupape m' s'ouvrira et le corps de pompe se remplira de nouvelle eau. On voit dans cette machine que l'élévation de l'eau n'aura de limite que l'intensité de la force dont on pourra disposer pour abaisser le piston M, mais que son effet sera nécessairement intermittent.

La pompe aspirante doit une grande partie, et quelquefois tout son effet, à la pression atmosphérique. Son mécanisme est représenté dans la *fig.* 100. M, est un piston

qui se meut dans un corps de pompe; il est muni d'une soupape *m'*, qui s'ouvre quand le piston descend, et qui se ferme quand le piston monte. Au bas du corps de pompe, mais bien souvent au dessus du niveau du liquide dans lequel plonge l'extrémité inférieure de la pompe, se trouve un diaphragme percé d'un trou et muni d'une soupape disposée comme celle du piston.

Si l'on fait mouvoir alternativement le piston M, on extraira de l'intérieur de la pompe une certaine quantité de l'air qu'elle contient. Sa force élastique diminuera, et la pression atmosphérique extérieure restant la même, l'eau s'élèvera dans le tuyau d'aspiration de la pompe, comme le mercure dans un baromètre. Cette eau arrivera bientôt jusqu'à la soupape *m*, et les mouvemens du piston continuant, elle remplira le corps de pompe lui-même et arrivera jusqu'à la soupape *m'*. Dès lors, chaque fois que le piston s'abaissera, l'eau contenue dans le corps de pompe ne pouvant redescendre, passera au dessus du piston, et celui-ci, en s'élevant de nouveau, non seulement produira l'aspiration, comme précédemment, mais soulèvera en même temps la colonne d'eau supérieure.

On conçoit que la distance entre la soupape *m'* et le niveau de l'eau ne pourra pas être plus grande que 32 pieds; car alors la pression de l'air ne pourrait jamais élever l'eau jusqu'au piston, et par conséquent elle ne pourrait jamais s'engager dans la soupape *m* pour arriver au dessus du piston, ce qui est la condition nécessaire de son élévation ultérieure. Il faudra même que l'élévation du piston au dessus du niveau de l'eau soit beaucoup moindre que 32 pieds, car ces sortes de pistons ne sont pas capables de produire un vide parfait; et d'ailleurs l'eau fournit, à toutes les températures, une certaine quantité de vapeur qui jouit d'une certaine force élastique.

On a réussi à combiner d'une manière avantageuse les deux sortes de pompes que nous venons de décrire, pour en faire ce que l'on nomme une *pompe aspirante et foulante*, dont le mécanisme est tracé dans la *fig.* 100. Le piston M n'a point de soupape, et le corps de pompe communique avec un tuyau latéral muni d'une soupape *m'*. La pompe est aspirante quand le piston M s'élève, et le corps de pompe se remplit; elle devient foulante quand le piston M s'abaisse, et l'eau renfermée dans le corps de pompe soulève la soupape *m'* et s'élève dans le tuyau latéral.

Les machines que nous venons de décrire sont plus ou moins avantageuses, suivant les localités où on les applique. On fait le plus souvent usage de la dernière, parce que le piston agit en montant comme en descendant, et que cette condition est favorable à l'application des puissances. Mais toutes ces pompes ont l'inconvénient de présenter une action intermittente, c'est-à-dire d'élever l'eau dans un de leurs mouvemens et de la laisser en repos dans l'autre. On y supplée en les combinant deux à deux et faisant jouer deux pistons par le même mécanisme.

Il existe un moyen accessoire que l'on ajoute aux pompes foulantes pour rendre l'émission de l'eau continue, et pour la lancer en jets à de très grandes hauteurs. Ce moyen consiste en un vase métallique rempli d'air et dans lequel on force l'eau à s'introduire à chaque coup de piston; l'air comprimé réagit sur le liquide, même dans l'intervalle des coups de piston; et si la puissance qui meut les pompes foulantes est considérable, l'eau peut être ainsi lancée à une centaine de pieds de hauteur. C'est sur ce principe que sont construites les pompes à incendie.

240. *Du Siphon.* On donne le nom de siphon à un tube de verre ou de métal courbé deux fois de manière à ce que ses branches deviennent à peu près parallèles, l'une

étant du reste plus longue que l'autre. On s'en sert pour faire couler un liquide contenu dans un vase, dans un autre vase placé plus bas, en passant par dessus les bords du premier, en sorte que le liquide doit s'élever d'abord pour retomber ensuite. Pour mettre cette machine en jeu, on renverse le tube et on le remplit en totalité du liquide sur lequel on veut agir; on ferme la plus longue branche avec un bouchon et la plus courte avec l'extrémité du doigt; on retourne alors le siphon, qui reste plein de liquide; on plonge la plus courte branche dans le vase qu'il s'agit de vider, et, en ouvrant la plus longue, le liquide commence à s'en échapper, ce qui continue jusqu'à ce que le vase supérieur soit vide, ou jusqu'à ce que la courte branche cesse d'être plongée dans le liquide. Il suffit, pour ainsi dire, de l'inspection de la figure 101 pour concevoir la théorie de cette machine : en effet, à l'une des extrémités du siphon, on trouve la pression atmosphérique agissant sur le liquide du vase; mais elle agit aussi à l'extrémité D du siphon. D'une autre part, dans la courte branche, on remarque la colonne de liquide A B élevée au dessus du niveau du vase, et qui tend à descendre en proportion de sa hauteur, tandis qu'on observe du côté opposé la colonne C D, qui tend aussi à descendre, mais avec une hauteur plus considérable, en sorte que l'une doit nécessairement l'emporter sur l'autre, et que le liquide doit couler de C en D. Cependant on pourrait imaginer que la colonne C D descendît sans que la colonne A B s'élevât; mais alors il surviendrait un vide à la partie supérieure du siphon, et la colonne B A devrait monter dans ce vide, en vertu de la pression atmosphérique. On donne à ce vide, qui n'existe pas, le nom de *vide virtuel*.

On peut apprécier aussi les causes qui mettent le siphon en jeu par un autre raisonnement. Supposant un dia-

phragme mobile situé dans le siphon au point *a*, ce plan sera pressé du côté de A en vertu du poids total de l'atmosphère, moins le poids de la colonne A B ; ce même plan sera pressé du côté de C par le poids de l'atmosphère moins la colonne C D : or, A B étant plus petit que C D, la pression du côté de A sera plus grande que du côté de C, et le diaphragme se mouvra de A en C. Comme on peut en dire autant de chaque couche du liquide, il en résulte que ce liquide coulera dans la direction indiquée. On voit aussi que si les deux colonnes du siphon étaient égales ou également plongées dans les liquides, les pressions deviendraient égales de part et d'autre et l'écoulement cesserait; ce qui arrive effectivement.

Pour éviter la nécessité de renverser le siphon et de le remplir de liquide, on le construit quelquefois comme dans la *fig.* 102; on plonge l'extrémité A dans le liquide; on ferme l'extrémité B avec un doigt, et on aspire vivement avec la bouche par l'ouverture C. Le vide partiel que l'on produit fait monter le liquide dans la courte branche et le fait même descendre à la longue au dessous du niveau du vase; ce qui suffit pour qu'il continue à couler lorsqu'on ôte le doigt de l'ouverture B.

Cet instrument, très usité en chimie et en physique, n'est pas moins employé dans les arts pour soutirer les liquides et les faire passer d'un vase dans un autre, sans agitation ni déplacement de ce vase.

Il existe des circonstances dans lesquelles le siphon peut être intermittent. Supposons, par exemple, *fig.* 103, le vase B C D E d'abord vide et contenant un siphon *a b c d* dont la courte branche serait au niveau de son fond, et dont la longue branche le traverserait pour descendre jusqu'au point *d*. Si l'on suppose que le vase se remplisse d'eau peu à peu au moyen d'un tuyau K, il pourra en recevoir jus-

qu'au niveau A, et même au dessus, sans qu'il s'en écoule aucune quantité, car la partie *b c d* du siphon sera encore pleine d'air; mais si le niveau s'élève jusqu'en B, le siphon se trouvant tout à coup rempli d'eau, elle s'écoulera rapidement par l'extrémité *d*; le vase pourra alors se vider complètement, pourvu que le siphon débite plus d'eau que le tuyau K n'en apporte. Alors, l'extrémité A du siphon ne plongeant plus dans l'eau, le siphon se remplira d'air et s'arrêtera; le vase se remplira de nouveau jusqu'au niveau B et recommencera à se vider; et ainsi alternativement, à des intervalles qui dépendront des vitesses relatives d'écoulement par le siphon et par le tuyau K.

C'est ainsi qu'on explique l'existence des fontaines intermittentes. Supposant au milieu d'une montagne une cavité A, *fig.* 104, qui puisse se remplir d'eau peu à peu par des filtrations intérieures, et que cette cavité communique avec le flanc de cette montagne par un canal sinueux *a b c*, lorsque cette cavité sera remplie jusqu'au niveau K, le siphon que représente le canal sinueux sera mis en jeu; toute l'eau s'écoulera par l'extrémité *c* jusqu'à ce que la cavité soit vide, et alors le siphon s'arrêtant, la cavité pourra se remplir de nouveau jusqu'à ce que le liquide parvienne encore au niveau K.

241. *Cuve hydro-pneumatique.* — On donne ce nom à une cuve (*fig.* 105) presque complètement remplie d'eau, dans laquelle se trouve une tablette horizontale, placée un peu au dessous du niveau de l'eau et percée de trous qui communiquent avec de petits entonnoirs renversés : on se sert de cet appareil pour recueillir et transvaser les gaz. La plupart des phénomènes qu'il présente sont liés à la pression atmosphérique. Si l'on renverse d'abord la cloche A et qu'on la remplisse d'eau, on pourra la redresser et la faire glisser sur la tablette : dans cet état, la cloche res-

tera pleine d'eau ; car la pression atmosphérique qui agit sur l'eau de la cuve n'agit point dans l'intérieur de la cloche, et par conséquent l'eau doit s'y élever autant que possible, c'est-à-dire, la remplir. Si cette cloche avait plus de trente-deux pieds de hauteur, elle offrirait un vide à la partie supérieure. Dans son état ordinaire, on doit la considérer comme un baromètre raccourci.

Dans la cloche B, qui contient un certain volume d'air C, l'eau est élevée jusqu'à une certaine hauteur, en sorte que cette colonne d'eau, plus la force élastique du gaz, fasse équilibre à la pression atmosphérique. Ainsi, la force élastique du gaz est égale à celle de l'air extérieur, moins le poids de la colonne d'eau ; d'où il suit que le volume de ce gaz est plus considérable qu'il ne serait sous la pression atmosphérique. Pour faire disparaître cette différence qui causerait des erreurs dans la mesure du volume des gaz, il faut enfoncer la cloche, comme on le voit en D, de manière que le niveau de l'eau soit le même en dedans et en dehors de la cloche. Ces effets sont encore bien plus prononcés dans la cuve hydrargyro-pneumatique, puisque le liquide que l'on emploie est 13 fois $\frac{1}{2}$ plus pesant que l'eau.

D'après ce que nous venons de dire, il semblerait qu'une cloche pleine d'eau et renversée dans l'atmosphère dût rester pleine, puisque la pression de cette atmosphère s'exerce de bas en haut sur l'ouverture de la cloche. Cependant cela n'arrive pas ordinairement, parce qu'il survient toujours quelque inégalité dans la hauteur des colonnes, et que le liquide descend d'un côté pendant que l'air monte de l'autre. Il y a deux moyens de prévenir ces inégalités : le premier consiste à fermer la cloche inférieurement par un plan de glace, ou même par une feuille de papier, ce qui suffit pour rendre la pression de l'atmosphère uni-

forme et maintenir le vase plein d'eau. Cette expérience se répète aisément avec un verre de table. Le second consiste à rétrécir beaucoup l'ouverture par laquelle le liquide peut s'écouler; l'adhérence qu'il contracte avec les parois de cette ouverture étroite maintient sa surface horizontale, quoique concave ou convexe, et le liquide est retenu dans le vase. Le petit instrument dont on se sert pour extraire une petite quantité de vin d'un tonneau, afin de le goûter, est construit sur ce principe; il est dans la forme de la *fig.* 107. On le saisit par son anse et on le plonge dans le vin par la bonde du tonneau; le vin s'y introduit par sa petite ouverture inférieure et se met au niveau; on applique alors le pouce sur l'ouverture supérieure, et on retire l'instrument. Il s'écoule d'abord un peu de vin à cause de l'excès de ressort du volume d'air enfermé entre le pouce et le liquide; mais bientôt la somme du ressort de l'air et du poids de la colonne de vin fait équilibre à la pression atmosphérique, et l'écoulement du liquide s'arrête, jusqu'à ce que, plaçant l'instrument au dessus d'un autre vase et détachant le pouce, les deux pressions atmosphériques se fassent équilibre, et le vin s'écoule par son propre poids.

Les gazomètres ordinaires et à niveau constant, dont on fait tant d'usage en chimie, sont fondés sur les mêmes principes.

242. *Fontaine intermittente.* — On donne ce nom à un instrument qui se trouve dans tous les cabinets de physique et dont le mécanisme est indiqué dans la *fig.* 108. Le pied de cette machine est un vase à double fond, dont la partie supérieure A communique avec la partie inférieure B, par une petite ouverture *d*. Du centre de la cloison commune s'élève un tube vertical *a c*, qui présente au point *a* une légère échancrure communiquant dans son intérieur. C'est

une sphère terminée par un tube plus gros que le précédent et présentant la forme d'un matras. On peut remplir cette sphère d'eau en l'enlevant et la redressant, puis la renversant tout à coup pour faire pénétrer le tuyau *ac* jusqu'au haut de la sphère. Cette espèce de réservoir présente en outre de petits tubes *o o*, par lesquels le liquide peut s'écouler et tomber dans la partie A du pied de l'instrument : cette chute a d'abord lieu librement, car l'air atmosphérique peut s'introduire par l'échancrure *a* du tube central et parvenir dans le haut du réservoir ; mais comme l'ouverture *d* est trop petite pour enlever au fur et à mesure l'eau qui tombe par les tubes *o o*, ce liquide s'accumule dans la cavité A, et finit par obstruer la petite échancrure *a*. Alors le réservoir C peut être considéré comme une cloche fermée de toutes parts, et l'écoulement du liquide par les tubes *o o* ne tarde pas à s'arrêter. Pendant cette suspension, le liquide contenu dans la cavité A s'écoule par l'ouverture *d*; l'échancrure *a* redevient libre; un certain volume d'air monte dans le réservoir, et l'écoulement recommence. Ces alternatives sont réglées par les rapports de dimension de l'ouverture *d* et des ouvertures *o o*.

Le mécanisme des quinquets à réservoir présente une véritable fontaine intermittente, comme on le voit (*fig.* 109). CC est un cylindre ouvert par sa partie supérieure, *cc* est un autre cylindre un peu plus petit et fermé de toutes parts, excepté la petite ouverture *e*: en enlevant ce second cylindre et le retournant : on le remplit d'huile par la petite ouverture; et si on le renverse ensuite rapidement dans le gros cylindre, il s'écoule par son ouverture assez d'huile pour que, son niveau s'élevant jusqu'en D, la petite ouverture s'y trouve plongée, et dès lors l'écoulement de l'huile est suspendu : mais le bas du gros cylin-

dre communique par un petit tuyau horizontal avec la cavité qui contient la mèche, et l'huile se met par conséquent de niveau dans cette cavité et parvient en D. Il arrive, par suite de la combustion qui s'opère autour de la mèche, que l'huile diminue en D′ et que son niveau baisse en ce point aussi bien que dans le gros cylindre. Quand cet abaissement est suffisant pour dégager la petite ouverture E, il s'y introduit une bulle d'air qui monte dans le réservoir et fait descendre une certaine quantité d'huile. On voit que ces instrumens ne sont pas précisément à niveau constant, mais que leur niveau est variable dans une très petite étendue; ce qui suffit pour alimenter régulièrement la combustion, attendu l'action capillaire de la mèche.

243. *Des Ventouses.* — Aucune application des moyens physiques à la médecine n'est plus simple et plus directe que le jeu du petit instrument que l'on nomme *ventouse*. Son effet consiste à soustraire momentanément une partie de la surface de la peau à la pression atmosphérique. Cet effet peut se produire de deux manières : si l'on prend une petite cloche à bouton (*fig.* 110), qu'on y verse une goutte d'esprit-de-vin rectifié, qu'on enflamme cet esprit-de-vin et qu'on renverse tout à coup la cloche en appliquant son ouverture sur la peau, l'air contenu, qui était fortement dilaté par la chaleur, et mêlé de beaucoup de vapeur d'eau, ne tardera pas à se condenser, aussi bien que cette vapeur, par le refroidissement; il y aura alors dans la cloche un vide partiel qui diminuera considérablement la pression que la peau éprouve dans l'état naturel; mais cet effet sera toujours incomplet.

On a perfectionné cet instrument en adaptant à la cloche (*fig.* 111) une petite pompe aspirante qui peut produire un vide presque complet, et même le renouveler, s'il venait à être rempli par des gaz ou des fluides émanés de la peau.

Les effets physiques de la ventouse montrent assez quelle est l'influence de la pression uniforme de l'atmosphère sur la peau ; car, dans le point où la ventouse est appliquée, la peau se bombe considérablement du côté de la cloche, comme si elle était fortement poussée de dedans en dehors ; elle devient très rouge par l'accumulation des fluides qui y abondent de toutes parts. Si l'application de la ventouse a duré quelque temps, le gonflement de la peau pérsiste après qu'on a enlevé l'instrument.

On a profité depuis long-temps de la turgescence de la peau, après l'application d'une ventouse, pour faire une saignée locale abondante en la scarifiant ; mais depuis peu on a imaginé un mécanisme à l'aide duquel la scarification peut être faite pendant l'application même de la ventouse et dans le vide qu'elle produit ; ce qui détermine un écoulement de sang très considérable et très rapide, dont la thérapeutique peut obtenir de grands avantages dans des cas graves et urgens.

On conçoit que l'application de la ventouse doit être un moyen certain d'extraire les liquides qui ont pu s'épancher dans les cavités du corps, dans la poitrine, par exemple, par la plaie même qui a été cause de l'épanchement ou par une ouverture artificielle ; et c'est, en effet, le moyen qu'on emploie lorsque l'extraction de ce fluide est indiquée.

DE L'ÉQUILIBRE DES CORPS QUI FLOTTENT DANS L'ATMOSPHÈRE.

244. Après avoir étudié la statique des fluides aériformes et la constitution de l'atmosphère, il est très facile de concevoir les circonstances d'équilibre d'un corps flottant librement au milieu d'elle. Il n'en sera pas de cet équilibre comme de celui d'un corps solide flottant dans un liquide, car le liquide présente une densité sensiblement uniforme

dans toute sa hauteur, tandis que la densité de l'atmosphère décroît rapidement à mesure qu'on s'élève. Il n'arrivera pas non plus qu'un semblable corps puisse parvenir à la surface de l'atmosphère et flotter sur elle, car il rencontrera, long-temps auparavant, une élévation à laquelle le poids spécifique de l'air sera devenu égal au sien. En effet, si nous supposons un corps d'un volume quelconque, et dont le poids spécifique soit précisément la moitié de celui de l'air à la surface du globe, il tendra à s'élever, et s'élèvera en effet, dans l'atmosphère, avec une force égale à l'excès du poids de son volume d'air sur son propre poids; mais en s'élevant ainsi, il se trouvera successivement placé dans les couches atmosphériques d'une densité décroissante, jusqu'à ce qu'il rencontre celle dont la densité est précisément la moitié de celle de l'air à la surface du globe; et alors il devra cesser de s'élever.

Les nuages nous offrent un exemple vulgaire et frappant de cette sorte d'équilibre : ils paraissent formés d'une espèce particulière de vapeur d'eau dont le poids spécifique est moindre que celui de l'air à la surface du globe; et ils se maintiennent dans l'atmosphère à environ une lieue d'élévation dans le point où la densité de l'air est égale à la leur. Cette élévation des nuages est extrêmement variable: 1° parce que leur propre densité peut varier beaucoup sous l'influence du soleil; 2° parce que la densité de l'atmosphère elle même est variable, en sorte qu'ils doivent descendre quand ils deviennent plus lords ou l'atmosphère plus légère, et qu'ils doivent monter quand ils deviennent plus légers ou l'atmosphère plus lourde.

245. *Des Aérostats.* La légèreté spécifique de l'air échauffé par le feu, et la découverte du gaz hydrogène, beaucoup plus léger que l'air, ont fait concevoir à d'ingénieux physiciens la possibilité de s'élever dans les hautes

régions de l'atmosphère ; et cette navigation nouvelle, plus brillante et plus extraordinaire que celle qui a été tant de fois célébrée, est parvenue rapidement au degré de perfection dont elle est susceptible.

Montgolfier construisit le premier un vaste ballon en toile recouverte de papier ; l'air intérieur fut dilaté par un foyer placé sous l'ouverture inférieure du ballon. Après plusieurs essais préliminaires, le premier aéronaute s'éleva dans l'air par la légèreté spécifique de l'ensemble de cet appareil. Ces moyens étaient pleins d'imperfections et de dangers : le volume du ballon devait être énorme, car la dilatation de l'air par le calorique est peu considérable ; l'humidité des nuages pouvait altérer cette frêle machine, et le feu était un danger plus imminent encore.

Le célèbre Charles imagina bientôt de construire le ballon en taffetas enduit d'un vernis imperméable et flexible, et de le remplir de gaz hydrogène qui, dans sa préparation la plus grossière, est encore 5 ou 6 fois plus léger que l'air. Il s'éleva dans un semblable ballon avec son ami Robert, du milieu du jardin des Tuileries, et fut rapidement transporté à quinze lieues de la capitale, où Robert mit pied à terre, tandis que Charles s'élevait seul avec toute la légèreté spécifique que lui donnait l'absence de son compagnon de voyage.

Depuis cette fameuse expérience on n'a presque rien changé à la construction des aérostats ; on les couvre d'un filet dont les cordes réunies supportent la nacelle dans laquelle est placé le voyageur. Une soupape placée à la partie supérieure du ballon et qu'on ouvre en tirant une corde, permet de laisser échapper du gaz ; on a soin que le ballon ne soit pas complètement rempli, afin que l'hydrogène puisse se dilater quand il se trouve soumis à une moindre pression. Enfin, on donne au ballon une légèreté spécifique

capable d'enlever avec le voyageur une certaine quantité de lest qu'il peut jeter à volonté pour s'élever, tandis qu'il peut descendre en ouvrant la soupape et laissant perdre du gaz.

On peut calculer aisément les dimensions que le ballon doit avoir pour enlever un poids donné, car on connaît le poids du volume d'air que le ballon déplace, et qui constitue la force ascendante. Et il suffit d'en retrancher la somme du poids du gaz hydrogène contenu, du ballon, de ses accessoires et du voyageur lui-même, pour obtenir la légèreté spécifique dont la machine jouira. Un ballon de 30 pieds de diamètre suffit ordinairement pour le voyage aérien d'un seul homme. On prépare le gaz hydrogène en faisant agir de grandes quantités d'acide sulfurique étendu d'eau sur de la tournure de fer, et le sulfate de fer qui en résulte est un produit qui paie une partie des frais.

M. Gay-Lussac a fait le voyage aérostatique le plus remarquable que nous connaissions; il est parti du Conservatoire des Arts et Métiers en 1804, et s'est élevé à 7000 mètres au dessus du niveau de la mer, hauteur à laquelle l'homme n'était jamais parvenu. Le baromètre, qui était à Paris à $0^{m},765$, est descendu dans sa nacelle à $0^{m},328$. Il a éprouvé un froid de 9° au dessous de zéro tandis que la température était à Paris de 27°,75.

Indépendamment des corps qui flottent dans l'atmophère en vertu de leur légèreté spécifique, on voit une foule de petits corps plus pesans que l'air, comme des poussières, des graines de plusieurs végétaux, leur poussière fécondante, etc., qui voltigent dans l'air, s'y soutiennent pendant quelque temps, et peuvent être transportées à de grandes distances. C'est ainsi qu'on voit croître sur le toit des chaumières un grand nombre de végétaux, dont les semences n'ont pu être transportées que par l'air. C'est

ainsi qu'un arbre mâle féconde au loin l'arbre femelle qui reçoit la poussière de ses étamines. Il faut admettre que les petits corps dont nous parlons sont soutenus dans l'atmosphère par les mouvemens mêmes qui l'agitent ; et l'on observe, en effet, que dans une chambre close où l'air est tranquille, une poussière fine se dépose sur tous les meubles. La présence de cette poussière dans l'air n'est pas ordinairement apparente; mais elle devient très sensible quand un rayon de soleil traverse une chambre obscure.

DES MOUVEMENS DES FLUIDES ÉLASTIQUES.

246. Les fluides élastiques réunissant à la mobilité des particules qui caractérisent les liquides une facile compressibilité et une élasticité parfaite, il devient tout à fait impossible d'appliquer le calcul aux mouvemens qu'ils peuvent exécuter en masse.

Il faut donc se contenter d'observer quelques cas particuliers, et de noter les faits les plus utiles.

On peut diviser les mouvemens de masse dont les fluides élastiques sont susceptibles, en trois sections distinctes, qui comprennent : 1° les mouvemens de l'atmosphère qui dépendent des attractions planétaires, de la chaleur solaire et de la rotation du globe; 2° les mouvemens que l'on peut imprimer artificiellement à certaine portion de l'atmosphère; 3° les écoulemens des gaz à travers des orifices.

247. *Des mouvemens naturels de l'atmosphère.* Le fluide élastique composé qui nous environne de toutes parts, est soumis à une multitude d'influences locales, qui doivent nécessairement déplacer sans cesse ses molécules les unes par rapport aux autres; car les couches superposées de l'atmosphère sont dans un état de densité relative à leur

élévation, ou, si l'on veut, placées à une hauteur relative à leur force élastique; en sorte que le moindre changement survenu dans la densité ou dans la force élastique d'une couche d'air, doit nécessairement lui faire quitter la place qu'elle occupe, pour s'élever ou s'abaisser dans l'échelle atmosphérique. Deux causes principales, le calorique et la présence de la vapeur d'eau, agissent continuellement dans ce sens. Si l'air est échauffé ou devient plus humide dans un point de son étendue, cette masse d'air s'élève. Si l'air est refroidi ou desséché, il descend dans l'atmosphère pour prendre son rang de poids spécifique.

Le soleil et la lune exercent sur la partie liquide du globe des influences attractives très prononcées, qui élèvent l'Océan dans les points qui correspondent momentanément à ces astres, pour le laisser retomber ensuite, ce qui produit le phénomène des *marées*. L'atmosphère doit être également sujette à une attraction planétaire et présenter un flux et un reflux journaliers, dont de Laplace a cru trouver l'indice et la mesure dans les mouvemens diurnes du baromètre dont nous avons parlé.

D'après ces considérations, il n'est pas extraordinaire que l'atmosphère soit sans cesse agitée dans une foule de directions et avec des vitesses très variables. On donne le nom de *vents accidentels* ou *irréguliers* à ces sortes de mouvemens de l'air dont il est impossible de se rendre un compte exact, en considérant surtout que les inégalités de la surface du globe, les rivières, les forêts, etc., doivent modifier encore les directions et les intensités de ces mouvemens, déjà déterminées par des causes si variables.

Il existe néanmoins à la surface du globe des courans d'air très réguliers qui portent le nom de *vents alisés*, et dont il est possible de se rendre un compte plus satisfaisant. Ces vents existent autour de l'équateur de la terre,

et s'étendent jusques vers les deux tropiques. Ils se meuvent ou paraissent se mouvoir d'orient en occident, c'est-à-dire dans le sens contraire au mouvement de rotation diurne de la terre. Ils sont extrêmement favorables aux grands voyages de mer par leur constance et leur régularité.

On peut concevoir facilement l'existence des vents alisés : en effet, la partie de la surface de la terre, qui est comprise entre les deux tropiques, est plus directement exposée qu'aucune autre aux rayons du soleil ; elle en est même assez fortement échauffée, pour conserver une température élevée pendant toute la durée des nuits. Cela étant, la partie de l'atmosphère qui est comprise dans cet espace doit être dilatée et rendue spécifiquement plus légère ; elle doit, par conséquent, s'élever sans cesse et se trouver remplacée par de l'air plus froid qui, des deux pôles, vient affluer vers l'équateur. Ce même air échauffé, arrivé dans les parties supérieures de l'atmosphère, doit en augmenter la hauteur et s'écouler par conséquent, en quelque sorte, vers les pôles, où il va se condenser et se refroidir, pour revenir encore à l'équateur en rasant la surface du globe.

L'effet isolé de l'action du soleil sur l'atmosphère, entre les tropiques, devrait donc se borner à produire des vents terrestres ou inférieurs, qui se porteraient des deux pôles vers l'équateur, et des vents supérieurs qui se porteraient aussi régulièrement vers les pôles, par les hautes régions atmosphériques. Les premiers sont, en effet, très sensibles dans les latitudes situées au delà des tropiques, sauf les grandes modifications que leur font subir les continens ou les mers qu'ils rencontrent sur leur passage. Mais une autre influence importante vient modifier ce premier effet : la totalité de l'atmosphère est entraînée dans le mouvement de rotation de la terre avec des vitesses proportionnelles à

la distance de chaque point de la surface à l'axe de rotation, en sorte que l'atmosphère située au 60e degré de latitude, par exemple, doit tourner comme cette partie de la surface de la terre, avec une vitesse moitié de celle qui anime la surface de la terre située vers l'équateur. Or, si le mouvement ascensionnel qui a lieu entre les tropiques amène vers l'équateur l'air qui occupait précédemment le 60e degré, cet air ne se trouvera pas avoir, en arrivant dans ce point, la même vitesse que le globe, et, par conséquent, tous les corps situées dans cette partie de la terre frapperont cet air animé d'une moindre vitesse qu'eux, et en éprouveront une réaction qui ressemblera parfaitement à un véritable courant d'air qui aurait lieu sur la terre en repos. On doit donc dire que les vents alisés ne sont pas de véritables courans d'air, ou du moins que ces courans sont seulement relatifs à la vitesse de rotation du globe.

Il faut en conclure que le navigateur qui ouvre ses voiles aux vents alisés, ne fait que retarder la vitesse de son vaisseau par rapport à la rotation de la terre, et que tandis qu'il croit marcher vers les Indes, ce sont les Indes qui viennent le trouver.

248. *Mouvemens artificiellement produits dans l'air.* — Le moyen le plus généralement employé pour produire de grands déplacemens dans l'atmosphère, consiste à échauffer artificiellement un certain volume d'air en lui ménageant des issues convenables pour s'élever, tandis que l'air froid peut arriver par d'autres ouvertures pour le remplacer successivement. Toutes les constructions de nos cheminées et de nos poêles sont fondées sur ce principe; mais on l'applique dans des circonstances où il n'est point question de chauffage. Par exemple, dans la plupart des mines, où l'on descend par plusieurs puits, il s'établit naturellement des courans qui renouvellent l'air de la mine,

ce qui dépend de quelque différence dans la température des différens puits ou dans leur profondeur. Mais lorsque cet effet naturel n'est pas suffisant, on place et on alimente un foyer de combustion dans un des puits, comme on le voit (*fig.* 112). L'air échauffé dans le puits A s'élève sans cesse pendant qu'il descend dans le puits B, de sorte qu'il s'établit dans la mine un courant continu de B en A.

C'est par la même méthode que l'on produit la ventilation ou le renouvellement de l'air des salles de malades. On dispose à l'une de leurs extrémités une espèce de hotte de cheminée avec un tuyau qui se rend sur les toits : l'élévation naturelle de la température de l'air de la salle suffit ordinairement pour établir le courant. Mais il importe, pendant l'hiver, que les ouvertures placées au niveau du sol, qui sont destinées à transmettre l'air du dehors dans la salle, ne puissent l'y laisser pénétrer que lorsqu'il s'est échauffé dans des appareils convenables : on réussit, de cette manière, à renouveler sans cesse l'air que les malades respirent, sans faire varier sa température.

Il existe une foule de moyens mécaniques, tels que les soufflets, les trombes, etc., qui servent à mettre en mouvement de petites masses d'air enfermées et comprimées dans des cavités. Mais on peut imprimer un mouvement assez rapide à des volumes d'air illimités, au moyen d'une machine fort simple, qui est connue sous le nom de *van* ou de *ventilateur* : son mécanisme est fondé sur les forces centrifuges qui naissent des mouvemens de rotation. La *fig.* 113 présente un instrument de cette espèce ; il consiste en un tambour légèrement construit et présentant sur ses deux faces des ouvertures circulaires et centrales *a b c*, tandis que sur une partie de sa circonférence sa cavité se prolonge en une pyramide tronquée et se termine par une ouverture carrée *o o*. Dans l'intérieur du cylindre creux se

trouve placé un moulinet A B D, formé de six ailes légères, qui peuvent tourner avec l'axe C au moyen d'une manivelle, et qui approchent autant que possible des parois internes du cylindre. Lorsqu'on imprime un mouvement de rotation rapide au moulinet, l'air contenu dans le cylindre prend une force centrifuge qui l'oblige à s'échapper rapidement par l'ouverture *o o*, tandis qu'il est sans cesse remplacé par de nouvel air qui s'introduit dans le cylindre à travers les ouvertures centrales *a b c*. On se sert de cette machine pour vanner les grains. On l'emploie comme soufflerie dans les fonderies, en donnant une grande vitesse de rotation aux ailes.

249. *De l'Écoulement des fluides élastiques par des ouvertures.* — Lorsqu'un fluide élastique est enfermé dans une capacité et qu'il s'en échappe avec une force quelconque, il arrive précisément le même effet que nous avons signalé en parlant des pressions des liquides sur les parois des vases qu'ils contiennent; c'est-à-dire que si le gaz est projeté dans un sens, le vase qui le contient éprouve une impulsion dans le sens contraire. On constate ce fait en plaçant un éolipyle sur une petite lampe portée elle-même sur un chariot très mobile; la vapeur qui s'échappe par l'ouverture de l'éolipyle produit dans l'appareil une répulsion qui fait marcher le petit chariot. C'est la même action qui produit le *recul* dans les armes à feu, l'ascension des fusées volantes et tous les mouvemens variés des pièces d'artifice.

L'emploi du gaz hydrogène percarboné, comme moyen d'éclairage, a donné lieu à des recherches intéressantes de MM. Gérard et Cagnard de Latour sur l'écoulement des gaz par des orifices. On conçoit que la quantité de cet écoulement doit dépendre de la pression ou de la force élastique, de la nature du gaz, des dimensions de l'ouver-

ture, et enfin de la longueur du canal, si l'écoulement n'a pas lieu par une ouverture en mince paroi. Les auteurs cités ont trouvé que le gaz hydrogène percarboné s'écoulait, dans les mêmes circonstances, beaucoup plus vite que l'air atmosphérique, mais non pas précisément en raison inverse de leurs densités. M. Faraday a cru reconnaître que l'écoulement était d'autant plus grand que la densité du gaz était plus faible. L'obstacle des tuyaux croît en raison directe de leur longueur et inverse de leurs diamètres ; la résistance, dans un même tuyau, paraît proportionnelle au carré de la vitesse moyenne ; enfin, la dépense par un tuyau donné d'une grosseur uniforme, est en raison directe de la pression et en raison inverse de la racine carrée de la longueur du tuyau.

DU CHOC ET DE LA RÉSISTANCE DES FLUIDES ÉLASTIQUES.

250. La question du choc et de la résistance des fluides élastiques, quoique extrêmement compliquée sous le rapport théorique, et ne se prêtant nullement au calcul, est cependant beaucoup plus simple, pour le cas de l'air atmosphérique, que la question du choc des liquides. En effet, dans l'atmosphère, il ne peut être question ni de l'élévation du niveau, ni des différences de densité : c'est toujours au milieu de la masse du même air que les phénomènes se passent. Il en résulte que nous n'avons à considérer que la vitesse et l'étendue ou la direction des surfaces choquées.

Il résulte de toutes les expériences, que l'intensité du choc de l'air sur un corps en repos, ou de la résistance de l'air au mouvement d'un corps, est toujours proportionnelle au carré de la vitesse.

On peut s'assurer de l'exactitude de cette loi, au moyen

d'un instrument que l'on nomme *anémomètre*, et qui sert à mesurer la force du vent; il consiste en un plan, d'une étendue donnée, supporté par un levier horizontal très mobile sur un axe vertical : on tourne ce plan de manière à l'exposer directement au vent qui règne, et l'on peut, à l'aide d'un contre-poids, le maintenir en repos malgré l'action du vent. La valeur de ce poids donne l'expression de la force qui agit actuellement sur le plan. Quant à la vitesse actuelle du vent, on la détermine en abandonnant un corps léger à son action, et comptant les secondes qu'il emploie pour parcourir un espace donné.

Cette loi de l'action de la résistance en raison du carré des vitesses, explique un grand nombre de phénomènes naturels et d'expériences curieuses. Par exemple, lorsqu'un corps tombe en chute libre dans l'atmosphère, la quantité de mouvement dont il peut être animé primitivement dépend des masses. La résistance que peut lui opposer l'air dépend de sa surface. Dans des corps de différens volumes, la masse croît comme le cube de l'une des dimensions; la surface croît seulement comme le carré de la même dimension. Ainsi, dans des corps de même nature, le plus petit aura moins de masse et plus de surface, le plus gros aura moins de surface et plus de masse; donc la résistance de l'air sera plus sensible pour les petits corps que pour les gros. D'une autre part, les corps ayant des densités différentes, peuvent offrir moins de masse pour la même surface, ou plus de surface pour la même masse; d'où il résulte que la résistance de l'air aura d'autant plus d'effet, que les corps auront un poids spécifique moindre.

Si nous considérons maintenant un corps quelconque tombant en chute libre dans l'atmosphère, comme la résistance de l'air, quelle qu'elle soit, croîtra comme le carré de la vitesse des corps, il arrivera nécessairement un terme

où cette résistance sera égale à l'action de la force accélératrice, et dès lors la chute du corps deviendra nécessairement uniforme, comme si on lui avait enlevé la pesanteur, ainsi qu'on le pratique dans la machine d'Atwood. Il faut ajouter que si la densité de l'air va croissant d'une manière sensible en s'approchant de la terre, la valeur de sa résistance peut croître encore après que le mouvement est devenu uniforme, et que, par conséquent, la vitesse du corps peut non seulement devenir uniforme, mais encore décroître de quelque chose.

Il est évident que le moment où la résistance de l'air deviendra égale à la force accélératrice, dépendra du rapport primitif de ces deux forces; et comme la résistance de l'air dépend de la surface, et l'intensité de la pesanteur de la masse, il en résulte que les corps les plus petits, et les corps qui auront le moindre poids spécifique, seront ceux qui acquerront plus tôt un mouvement uniforme par suite de la résistance de l'air. Mais comme aussi la vitesse uniforme, après le mouvement accéléré, est proportionnelle à la durée de ce mouvement accéléré, il en résulte que les petits corps, ou les corps légers, prendront, en tombant dans l'atmosphère, une vitesse uniforme, mais très peu considérable; tandis que les corps d'un grand poids spécifique et d'un grand volume prendront aussi un mouvement uniforme s'ils tombent d'une assez grande hauteur, mais un mouvement très rapide. C'est ainsi que les poussières suspendues dans l'atmosphère tombent très lentement, que la pluie et les petits grêlons tombent avec une vitesse médiocre, tandis que les grosses masses de glace ou les pierres météoriques tombent avec des vitesses capables de produire les accidens les plus graves.

L'intensité du choc des fluides élastiques est évidemment proportionnelle à l'étendue des surfaces choquées.

On ne connaît pas l'influence précise des angles d'inclinaison sous lesquels le choc peut avoir lieu; on sait seulement que le choc est plus puissant sur une surface concave que sur la même surface plane ou convexe.

En suivant l'exemple de la chute libre des corps dans l'atmosphère, dont nous nous sommes servis précédemment, on conçoit que l'on peut donner artificiellement à un corps, d'un poids donné, une surface plus ou moins étendue, dans le sens où l'air doit opposer une résistance à sa chute. En augmentant ainsi la valeur de la résistance de l'air, sans augmenter la masse dans la même proportion, on peut singulièrement modifier la vitesse de la chute des corps. Ce fait peut être constaté par les expériences les plus simples. Si l'on abandonne en chute libre un carton mince dans la situation horizontale, il arrivera à terre d'un mouvement uniforme et très lent; si on l'abandonne dans la situation verticale, sa chute sera très rapide.

On a profité de cette circonstance remarquable pour exécuter, de nos jours, l'expérience la plus hardie que les hommes aient jamais tentée. Un aéronaute place au dessus de sa nacelle une espèce de grand parapluie qui prend le nom de *parachute* : une corde qui passe par le centre de ce parachute suspend tout l'appareil au ballon, et des cordons partant des bords de la nacelle vont se fixer à la circonférence du parachute qui reste fermé pendant l'ascension. Arrivé dans les hautes régions de l'atmosphère, l'aéronaute coupe la corde qui le tient uni à son ballon; il tombe alors en chute libre et d'un mouvement accéléré; mais la résistance de l'air ouvre le parachute et ralentit bientôt le mouvement de manière à le rendre uniforme et assez modéré pour que le voyageur arrive à terre sans accident.

La résistance de l'air, qui croît comme le carré des vi-

tesses, peut non seulement diminuer ou suspendre des mouvemens produits par d'autres causes, mais elle peut encore devenir la source de mouvemens de translation très remarquables. C'est ainsi que se conçoit le vol des oiseaux qui, munis d'une grande force musculaire, relativement à leur poids, et frappant l'air avec vitesse de haut en bas, par les larges surfaces de leurs ailes déployées, y trouvent une résistance qui leur sert de point d'appui pour s'élever dans l'atmosphère et pour y exécuter les mouvemens les plus variés.

L'imagination égarée de quelques hommes trop peu instruits les a portés à faire beaucoup de tentatives, souvent malheureuses et toujours inutiles, pour s'élever dans l'air à la manière des oiseaux, sans réfléchir que la force musculaire de ces animaux est peut-être cent fois plus grande que celle de l'homme, eu égard à leur poids relatif et que d'ailleurs la vitesse de cette contraction est beaucoup plus grande.

Les mouvemens dont l'air peut être animé par lui-même, en vertu des causes que nous avons indiquées, produisent des vents dont les vitesses variables forment un des principaux caractères et leur ont fait donner les noms de *vents doux*, *vents vifs*, *vents violens*, et enfin d'*ouragans*. Cette vitesse peut être extrêmement petite, en sorte que les mouvemens de l'air soient à peine sensibles; elle peut être de 3 ou 4 mètres par seconde, et le vent est déjà vif; lorsqu'elle est de 40 ou 50 mètres par seconde, elle produit un ouragan. Il paraît même que dans ces circonstances désastreuses la vitesse du vent a quelquefois été beaucoup plus considérable.

On aurait peine à concevoir les terribles effets des ouragans qui déracinent les arbres, renversent les habitations, et soulèvent les flots de la mer jusqu'à d'immenses hauteurs, si l'on n'avait une idée précise de la grande masse

de l'atmosphère, du poids considérable de l'air et de la vitesse dont nous venons de parler.

Les mouvemens mo dérés del'atmosphère sont aussi utiles aux êtres organisés qui habitent la terre, que ses grandes agitations sont dangereuses. En effet, c'est seulement à la faveur de ces agitations continuelles que l'air conserve, dans tous les points de la surface du globe, et à toutes les hauteurs de l'atmosphère, cette uniformité de composition qui le rend partout également propre à entretenir la vie des animaux comme celle des végétaux. Altéré de toutes parts dans sa composition, mais dans des sens différens ou même opposés, il cesse bientôt d'environner l'animal qui l'a surchargé d'acide carbonique pour aller le fournir à une plante à l'existence de laquelle il est nécessaire; et réciproquement il apporte le matin dans nos habitations l'air pur qui se dégage des plantes, sous l'influence du soleil.

Les mouvemens modérés de l'atmosphère peuvent avoir assez d'énergie pour être employés comme agens mécaniques, sans briser les machines qui en reçoivent l'impression, et c'est le cas des vents les plus ordinaires. La plus brillante application que l'homme ait faite de cette puissance est, sans contredit, la navigation. Les voiles de nos vaisseaux, disposées de la manière la plus remarquable pour recevoir l'impulsion du vent et la transmettre à la masse pesante du bâtiment, peuvent aussi disparaître en quelque sorte tout à coup, lorsque l'impétuosité du vent fait redouter un danger; et la carcasse solide du vaisseau, fermée de toutes parts, est alors livrée pour un temps à la fureur des vagues. Le calme rétabli, les voiles se tendent de nouveau, et le voyage recommence à travers l'Océan sans autres guides que la boussolle et les astres. Il y a une science profonde dans la combinaison des formes, de l'é-

tendue, de la direction et de la manœuvre de ces voiles, dans l'art d'obtenir un mouvement donné du vaisseau en composant la direction du vent avec la résistance du fluide qui porte le bâtiment. Mais l'étendue de ce sujet nous force à renoncer à en donner même une idée superficielle.

Un assez grand nombre de machines fixées sur le sol sont mises en mouvement par la force du vent. Les plus communes sont ce que l'on nomme des *moulins à vent*, parce qu'elles sont spécialement destinées à la mouture des grains. La manière dont la force du vent est mise à profit dans ces sortes de machines est tout à fait remarquable : on ne pouvait pas faire usage d'une roue à aubes, comme dans le cas où l'on veut profiter du courant d'un liquide, car ce mécanisme devient de nul effet quand on le plonge en entier dans le courant, et c'est la condition obligée des machines mues par l'air.

Les ailes des moulins à vent sont dans une situation verticale et peuvent se tourner à volonté, perpendiculairement à la direction du vent. Si elles étaient planes, elles en recevraient une impression directe qui ne saurait donner à l'axe horizontal qui les porte aucun mouvement de rotation; mais chacune d'elles est, en quelque sorte, tordue dans le même sens, de manière à former avec le plan commun de leurs lignes moyennes un angle d'environ 55°. Par cet artifice, la force du vent qui les frappe directement se décompose en deux portions, dont une, parallèle à leurs surfaces, fait, en quelque sorte, glisser le courant d'air en changeant sa direction, tandis que l'autre agissant suivant le plan commun des ailes, produit le mouvement de rotation.

On a imaginé un grand nombre de constructions diverses, plus ou moins savantes, pour remplacer cette méthode

antique dirigée par la seule expérience. Aucune de ces innovations n'a reçu d'application générale.

MOUVEMENT VIBRATOIRE DES FLUIDES ÉLASTIQUES.

251. Les fluides élastiques sont éminemment susceptibles des vibrations que nous avons remarquées dans les corps solides ou liquides, car leurs molécules sont aussi dans un état d'équilibre dont elles peuvent être sorties par un mouvement brusque; mais il faut remarquer que chez eux l'équilibre est produit entre la force de répulsion de leurs particules et la pression qu'ils supportent, laquelle est ordinairement celle de l'atmosphère, cette pression étant bien moindre que la force d'élasticité dans les solides. On comprend déjà que les vibrations seront en général bien moins rapides dans leur transmission, on conçoit aussi que les formules mathématiques qui expriment les lois de ces vibrations seront beaucoup plus simples que pour les corps solides; car il est ici question d'un véritable pendule qui va osciller en vertu d'une force qui est la pression de l'atmosphère ou l'élasticité du gaz, et d'une autre part la densité des masses à mouvoir aura son influence, et de là la formule de Newton $V=\sqrt{\frac{e}{d}}$, c'est-à-dire que la vitesse égale la racine carrée de l'élasticité divisée par la densité.

Les corps solides ne se prêtent pas aisément à tous les modes d'ébranlement de leurs molécules à cause des grandes puissances qui les retiennent en place, mais les fluides élastiques au contraire subissent les moindres agitations et peuvent vibrer de toutes les manières.

On peut se faire une idée générale des ébranlemens produits dans l'air, en se représentant un grain de poudre qui

s'enflammerait dans le centre d'une sphère de gaz, il y aurait d'abord expansion; la couche environnante serait poussée en dehors, elle transmettrait ce mouvement à la suivante et resterait en repos; la seconde pousserait la troisième, ainsi de suite, avec une vitesse $=\sqrt{\frac{e}{d}}$, mais un instant après il y aurait condensation, la première couche serait attirée en dedans et le mouvement inverse se transmettrait de couche en couche comme le précédent et suivant la même loi.

En s'éloignant du centre d'ébranlement on rencontrerait la couche actuellement ébranlée à une distance quelconque ; cet ébranlement n'aurait pas lieu au même instant que le mouvement primitif, mais bien après le temps nécessaire pour la transmission, après une seconde, par exemple, si la distance était de 337 mètres, comme l'expérience l'a démontré. Il est clair que toutes les couches comprises entre le centre et le point situé à 337 mètres seront plus ou moins comprimées au moment de la communication du mouvement.

Si on se représente le moment de condensation qui suit, on voit qu'il y aura une succession de couches dilatées, et mues dans le sens contraire, et que la couche agitée dans le second mouvement sera également à 337^m au bout d'une seconde, en supposant que l'expansion ait duré une seconde et la condensation une seconde; mais si les deux mouvemens n'avaient duré chacun qu'une demi-seconde, la lame comprimée ne serait arrivée qu'à $168^m,5$ quand la première lame aurait été dilatée. De sorte que dans la longueur de 337^m il y aura la moitié appartenant à l'expansion, et l'autre à la condensation.

On nomme *onde sonore* l'ensemble de ces deux effets

dont la moitié se nomme demi-ondulation comprimée, et l'autre demi-ondulation dilatée.

Si l'on suppose que la première masse d'air répète ses mouvemens avec continuité, il y aura aussi une succession continue d'ondes transmises.

Il s'en faut de beaucoup que les mouvemens alternatifs soient jamais aussi lents dans un corps qui vibre, en sorte que les impulsions se répètent plusieurs fois avant que la première arrive à 337^{m}. Si par exemple il se faisait 337 compressions dans une seconde, l'onde sonore entière n'aurait qu'un mètre de longueur, et elle serait formée d'un demi-mètre comprimé et d'un demi-mètre condensé.

Chacune des ondes mettrait toujours une seconde pour arriver à 337^{m} de distance, mais une fois cette couche ébranlée l'ébranlement se répéterait 337 fois par seconde: c'est cette répétition uniforme qui constitue un son, c'est le nombre d'ébranlement par seconde qui en détermine la valeur, et l'on voit que cela n'a rien de commun avec la transmission dont la vitesse est constante pour tous les sons.

On peut distinguer un certain nombre de méthodes différentes en apparence, et semblables, pour le fond, à l'aide desquelles on produit des vibrations dans l'air.

1° Un corps solide élastique, qui est actuellement en vibration, entraîne dans ses mouvemens alternatifs, l'air qu'il touche immédiatement, et celui-ci les transmet à la masse environnante.

2° Une lame mince et flexible, pouvant intercepter ou permettre alternativement le passage de l'air dans un tube, détermine des vibrations dans cette colonne d'air. C'est ce qui arrive dans l'usage des *anches*.

3° Un courant d'air rapide peut venir frapper sur un

corps solide aigu ou tranchant, et ses particules entrer ainsi en vibration; c'est ce qui arrive dans le *sifflet*.

4° Enfin, un certain espace se trouvant subitement vide d'air, l'atmosphère peut se précipiter dans ce vide, s'y comprimer, en ressortir, et entrer ainsi en vibration. C'est ce qui arrive dans l'expérience du *crève-vessie*, dans le coup de fouet, dans le mouvement rapide d'une baguette agitée dans l'air, et peut-être dans une foule d'autres circonstances.

Il est probable que les vibrations de l'air produites par un des moyens que nous venons d'indiquer, peuvent avoir toute sorte de vitesses; mais elles n'affectent notre oreille et ne produisent ce qu'on nomme le *son*, que lorsqu'elles ont une certaine rapidité, qui paraît être d'environ trente-deux vibrations par seconde.

Il est évident que l'on doit considérer à part les vibrations qui peuvent agiter un certain volume d'air regardé comme corps sonore, et la transmission des vibrations produites par une cause quelconque à travers les fluides élastiques, circonstance dans laquelle le fluide élastique sert d'intermédiaire, sans être la cause du phénomène.

DES VIBRATIONS DE L'AIR CONSIDÉRÉ COMME CORPS SONORE.

252. Puisque les fluides élastiques n'ont, par eux-mêmes, ni volume ni figure déterminés, il est nécessaire, pour apprécier les vibrations de l'air considéré comme corps sonore, vibrations qui dépendent essentiellement du volume et de la figure, d'enfermer l'air dans une cavité d'une capacité quelconque, dont on puisse mesurer la forme et l'étendue.

Le moy enle plus simple et le plus usité de circonscrire un volume d'air pour lui faire rendre des sons,

consiste à employer des tuyaux ordinairement cylindriques, et dont les orgues nous offrent des exemples et des modèles.

Étant donné un tuyau cylindrique fermé par une de ses extrémités, rétréci, mais ouvert par l'autre, de manière qu'on puisse y souffler de l'air avec force, il reste à trouver le moyen de faire vibrer l'air contenu dans ce tuyau. On y réussit dans ce que l'on nomme les *tuyaux à bouche*, en pratiquant sur un des côtés du tuyau, et près de l'extrémité par où vient le vent, une fente transversale dont la lèvre supérieure soit déprimée en dedans, de façon que l'air, tendant à sortir par la fente, vienne se briser contre cette lèvre tranchante, ce qui produit des vibrations qui se communiquent à la masse d'air contenue dans le tuyau, et lui font rendre un son.

Dans l'instrument que nous venons de décrire le son produit est évidemment indépendant de la matière solide qui compose le tube; car il reste le même, que le tuyau soit en métal, en bois ou en carton, etc. Ce son dépend, au contraire, directement, de la longueur de la colonne d'air, de son degré d'élasticité, et de la vitesse avec laquelle le courant d'air inférieur vient frapper la lame tranchante. Cela est si vrai, que les sons deviennent, toutes choses égales d'ailleurs, d'autant plus graves, ou les vibrations plus lentes, que le tuyau est plus long, qu'à des températures différentes le tuyau ne rend pas le même son, et qu'enfin on change tout à coup considérablement la nature du son, en modifiant la vitesse avec laquelle le courant d'air vient frapper la lame tranchante.

Si l'on cherche à se représenter comment la masse d'air contenue dans le tuyau s'agite pour rendre un son, il faudra supposer que la couche d'air circulaire qui répond à la lame tranchante sera d'abord ébranlée de manière à com-

primer ou distendre alternativement la couche la plus voisine, et que cet effet se transmettra et se répétera dans toutes les lames d'air successives, depuis ce point jusqu'à l'extrémité fermée du tuyau. Il faudra comprendre encore que la lame solide qui forme le fond du tuyau s'il est bouché, réfléchira de semblables vibrations dans le sens contraire, mais à contre-temps, c'est-à-dire que le moment de l'onde comprimée correspondra au moment de l'onde dilatée des vibrations originaires. Il sera important de remarquer que cette communication des vibrations dans la longueur d'une colonne d'air exige un temps qui, comme nous le verrons, a été déterminé par des expériences précises, et peut être évalué à une seconde pour 1024 pieds; en sorte que si le tuyau avait 512 pieds de long, une vibration emploierait une seconde à parvenir jusqu'à son extrémité et à en revenir. Et comme les vibrations sont en général très rapides, il doit en résulter des intervalles plus ou moins considérables le long du tuyau, entre une onde comprimante et la suivante; et comme aussi celles qui reviennent vont aussi vite que les premières, elles doivent se rencontrer dans la longueur du tuyau, suivant certaines lois entièrement soumises à la rapidité plus ou moins grande avec laquelle les vibrations se succèdent.

Les considérations du genre de celles que nous venons d'exposer étant parfaitement susceptibles d'être soumises au calcul, et les résultats qu'on a obtenus, en les y soumettant effectivement, coïncidant exactement avec les résultats des expériences, il en résulte que toute cette explication du mode de vibration de l'air dans un tuyau n'est plus une supposition, mais une vérité démontrée. On voit, du reste, qu'il y a beaucoup d'analogie entre ce mode de vibration et celui des verges élastiques rigides, dans leur sens longitudinal.

Nous nous contenterons d'exposer ici les résultats généraux du calcul et de l'expérience, quant aux modifications que présentent les vibrations d'une semblable colonne d'air sous différentes conditions.

a. La rapidité des vibrations d'une colonne d'air est en raison inverse de sa longueur.

b. Une même colonne d'air contenue dans un tuyau fermé par un bout donne, avec le courant d'air le plus lent (pourvu qu'il y ait un son produit), le son le plus grave qu'elle puisse produire. Si l'on augmente successivement la rapidité du courant d'air, on obtient des sons indiquant des vibrations toujours plus rapides, dans la proportion des nombres 1, 3, 5, 7, etc.; et, d'après les principes que nous avons établis (165), il paraît certain que cette série d'accroissement dans la rapidité des vibrations dépend de ce que la colonne d'air se divise spontanément en plusieurs portions qui vibrent séparément, en sorte qu'il s'établit 0, 1, 2, 3, etc., nœuds de vibration.

c. Si l'on vient à rendre libre l'extrémité du tuyau qui était fermée dans les cas précédens, le son produit par le plus faible courant d'air possible se trouve être l'octave, qui indique des vibrations deux fois plus rapides, ce qui tient sans doute à ce que les vibrations de l'air se transmettent à l'extérieur, au lieu de se répercuter dans l'intérieur du tuyau, et, par conséquent, n'ont plus à parcourir qu'une fois cette longueur, ce qui équivaut à un tuyau moitié plus court.

d. En modifiant la vitesse du courant dans un tuyau ouvert, on obtient successivement des sons qui indiquent des vibrations plus rapides, dans la proportion des nombres 2, 4, 6, 8, etc. Ces différences tiennent encore à l'établissement de 1, 2, 3, 4, etc., nœuds de vibration; c qu'il est du reste facile de démontrer, puisque l'on peut

pratiquer des trous au tuyau dans le lieu géométrique où ces nœuds doivent se trouver, sans changer la nature du son. C'est ce qui arrive dans la flûte, dans la clarinette, et dans tous les instrumens à vent, où ces trous servent principalement à déterminer d'une manière précise la formation du nœud de vibration dans l'endroit où il tend à s'établir.

e. Lorsqu'un tuyau est en partie fermé ou rétréci, les sons produits deviennent un peu plus graves; ils deviennent un peu plus aigus lorsque le tuyau est évasé, ce qui est une conséquence naturelle de ce que nous avons dit sur les tuyaux ouverts ou fermés, et ce qui explique pourquoi ceux qui donnent du cor enfoncent plus ou moins la main dans le pavillon de cet instrument.

f. Le degré d'élasticité de l'air influe considérablement, comme il est facile de le prévoir, sur la nature des sons ou sur la vitesse des vibrations. Elles sont plus rapides dans une masse d'air comprimée, ou dans une masse d'air échauffée qui ne peut pas se dilater librement. On observe en général que les instrumens à vent *montent* ou produisent des vibrations plus rapides quand l'air est plus chaud, L'inverse arrive aux instrumens à corde.

DE QUELQUES INSTRUMENS A VENT.

253. *L'orgue* est sans contredit le plus remarquable des instrumens à vent. Il est formé d'un grand nombre de tuyaux ouverts ou fermés qui, par leur différence de longueur, fournissent une grande variété de sons, depuis les plus graves jusqu'aux plus aigus. Les extrémités inférieures de ces tuyaux sont implantées dans des trous percés à la face supérieure d'une caisse de bois qu'on nomme *sommier*, et dans laquelle pénètre le vent fourni par de vastes soufflets. Chaque touche des différens claviers est destinée à

lever une des petites soupapes qui ferment les ouvertures des tuyaux. Mais ces tuyaux ne sont pas tous disposés comme celui que nous avons décrit dans l'article précédent, et que nous avons nommé tuyau à bouche. Il en est d'autres que l'on nomme *tuyaux à anche*, et dont la disposition particulière doit être décrite ici, pour nous servir plus tard à l'intelligence de la voix.

Le tuyau à anche est formé de deux parties distinctes, dont l'une est destinée à transmettre le son, et l'autre à mettre l'air en vibration. On peut se représenter l'extrémité rétrécie du tuyau qui transmet le son, comme la queue d'un entonnoir que l'on placerait sur l'extrémité d'un tuyau cylindrique qui reçoit directement l'air du sommier, et qu'on appelle *porte-vent*. Cette espèce de queue d'entonnoir n'est point une ouverture libre; elle est taillée en gouttière et presque fermée par une petite lame élastique qui ne laisse à l'air qu'un passage fort étroit. Lorsque cet air est comprimé dans le tuyau porte-vent, il s'introduit dans la gouttière étroite; mais quand il a acquis une certaine vitesse, la lame flexible, comprimée en dehors, vient s'appliquer sur l'ouverture et la ferme. Le courant d'air est ainsi suspendu un instant, et alors la lame élastique se redresse, et l'ouverture devient libre. Ces mouvemens, qui se succèdent avec rapidité, impriment à la colonne d'air des vibrations dont la nature dépend de l'étendue de l'ouverture, du degré d'élasticité de la lame, et surtout de la longueur de sa partie mobile, puisque cette lame elle-même doit présenter des oscillations d'autant plus rapides qu'elle est plus courte. En réfléchissant à ce mécanisme, on voit qu'il y a beaucoup d'analogie avec ce qui se passe dans le bélier hydraulique.

La manière dont on fait rendre des sons à une clarinette, est fort analogue aux tuyaux à anche dont nous venons de

parler. La cavité de la bouche sert de porte-vent ; l'embouchure de la clarinette présente une petite lame de bois flexible, qui est l'anche; et les lèvres, en comprimant cette lame dans différens points, alongent ou raccourcissent sa partie mobile.

La flûte est, après le tuyau d'orgue, l'instrument à vent le plus facile à concevoir, et le plus utile comme moyen d'expérience. Il présente un tuyau cylindrique d'une longueur déterminée; la colonne y est mise en vibration par le choc de l'air insufflé par les lèvres contre les bords d'une ouverture ronde, pratiquée tout près de l'extrémité fermée du tube. Sur la longueur du cylindre se trouvent des ouvertures qui peuvent être à volonté ouvertes ou fermées par l'application des doigts. Lorsque tous les trous sont fermés, l'instrument rend le son le plus bas possible en soufflant doucement et largement. On obtient facilement d'autres sons, en laissant un ou plusieurs trous ouverts, car cela produit le même effet que si l'on raccourcissait le tube.

La trompette et *le cor de chasse* sont deux tuyaux simples ordinairement contournés sur eux-mêmes, ce qui ne change rien à la production des sons, et terminés par une extrémité évasée, ce qui influe aussi très peu sur la nature des sons, mais ce qui augmente considérablement l'énergie de leur transmission au dehors. Aucune construction intérieure, aucun appareil particulier n'est destiné, dans ces instrumens, à produire la vibration de l'air. Les deux lèvres du musicien rapprochées et tendues, pour ne laisser qu'une petite ouverture à travers laquelle l'insufflation de l'air a lieu, remplacent ici l'anche dont nous avons parlé précédemment. Ce sont elles qui produisent et modifient les brations.

DE LA TRANSMISSION DES VIBRATIONS DANS LES FLUIDES ÉLASTIQUES.

254. — Nous avons eu souvent l'occasion de dire que les vibrations des corps élastiques, lorsqu'elles étaient suffisamment rapides, produisaient sur nos organes un genre particulier d'impression, auquel on a donné le nom de *son*. Cette impression peut, comme nous l'avons dit, se transmettre directement du corps vibrant à nos organes, comme on peut s'en assurer par l'expérience du crin fixé entre les dents. D'autres fois, c'est un corps solide ou même un liquide qui sert d'intermédiaire; mais, dans le plus grand nombre des cas, c'est l'air atmosphérique lui-même qui transmet ces vibrations; et nous possédons, ainsi qu'un très grand nombre d'animaux, un organe spécial destiné à percevoir et à juger les vibrations des corps sonores transmises par l'air.

Il est facile de démontrer que l'air est véritablement le véhicule ordinaire du son. En effet, si l'on place une sonnerie à ressort sous le récipient d'une machine pneumatique, en ayant soin de poser la sonnerie sur un corps mou pour éviter la transmission du son par le plateau même de la machine pneumatique, on observera que le son deviendra d'autant plus faible que l'air sera plus raréfié dans la cloche, et qu'il sera imperceptible lorsque le vide sera complet.

Tout autre fluide élastique que l'air, et les vapeurs ellesmêmes jouissent de la propriété de transmettre le son. Mais l'intensité de ce son, transmis à une distance donnée, paraît être en raison directe de la densité du fluide élastique.

Si l'on considère ce qui se passe lorsqu'un corps sonore

est en vibration au milieu d'une masse d'air indéfinie, on concevra que les impulsions du corps sonore se transmettant dans toutes les directions à la fois, les impressions reçues par une oreille située à des distances variables du corps sonore, seront d'autant moins intenses que la distance sera plus grande, car l'expansion des vibrations sonores se faisant sans cesse d'une surface sphérique plus petite à une plus grande, à chaque couche successive le nombre des molécules qui reçoivent une impulsion est plus considérable que le nombre des molécules qui la communiquent. Il paraît que l'intensité du son est en raison inverse du carré de la distance.

Si la propagation du son, au lieu de s'opérer dans un espace sans limite, avait lieu au contraire le long d'un canal cylindrique et uniforme, on ne verrait aucune raison pour que l'intensité du son diminuât par l'éloignement; en supposant du moins, ce qui est probable, la parfaite élasticité de l'air. C'est en effet ce que toutes les expériences confirment. On fait usage en Angleterre de longs tuyaux de fer blanc d'un pouce de diamètre qui, en suivant les anfractuosités des appartemens, et après des détours multipliés, se portent souvent d'une extrémité de la maison à l'autre. Il suffit cependant de parler à voix basse dans une embouchure placée à l'extrémité de ce long canal, pour être entendu distinctement à l'autre; ce qui présente sans doute un moyen de communication directe bien supérieur à tous les autres, et qu'il serait désirable de voir établir en France.

M. Biot a constaté, sur des tuyaux de fonte placés pour la distribution des eaux de l'Ourcq dans les aqueducs de Paris, qu'on entendait distinctement la voix la plus basse à une distance de 951 mètres, au point qu'il n'a pu déterminer quel était l'abaissement du ton de la voix où elle

cessait d'être entendue. Il faut remarquer que le plus grand silence extérieur était indispensable au succès de l'expérience de M. Biot, et qu'elle a dû être faite au milieu de la nuit, attendu que la multitude des bruits extérieurs s'opposait pendant le jour à la perception du son entre deux interlocuteurs aussi éloignés l'un de l'autre.

On observe un phénomène du même genre sous des voûtes qui se croisent à angles droit et forment une gouttière rectangulaire continue depuis la bouche d'un interlocuteur jusqu'à l'oreille de l'autre. Cette gouttière représente un démi-canal dans lequel la transmission du son se fait sans beaucoup de perte. On peut répéter cette expérience dans une des salles du Conservatoire des Arts et Métiers.

255. L'énergie de la transmission des sons peut être considérablement modifiée par la configuration particulière des espaces dans lesquels il se transmet d'abord avant de se répandre à l'extérieur ou d'arriver à l'oreille, ce qui donné lieu à l'invention de divers instrumens, dont les uns ont pour usage de transmettre au loin les sons produits dans leur intérieur, et les autres d'augmenter dans l'intérieur de l'oreille les effets des sons qui viennent du dehors.

Le *porte-voix* (*fig.* 114) est un tube de forme conique qui porte à sa petite extrémité une embouchure qui s'applique exactement autour de la bouche, tandis que son autre extrémité s'évase en un large pavillon. Si l'on parle dans cet instrument, la voix se propage à une très grande distance dans la direction vers laquelle on tourne son pavillon; mais elle est d'autant moins distincte dans toute autre direction. On a cru long-temps que la substance élastique dont on compose ordinairement cette machine entrait elle-même en vibration pour augmenter l'intensité

des sons. D'autres ont pensé que les *rayons* sonores pouvaient être réfléchis dans l'intérieur, et portés tous dans la même direction. Ces explications tombent d'elles-mêmes quand on considère que les effets du porte-voix ne sont nullement diminués quand on le garnit de drap à son intérieur.

Pour comprendre les effets de cette machine, il faut se rappeler, que dans une atmosphère libre, les vibrations de l'air se transmettent dans tous les sens à la fois, et doivent être d'autant moins intenses, dans une direction donnée, que ces directions sont plus nombreuses; tandis que, dans le porte-voix, et en vertu de la parfaite élasticité de l'air, les vibrations ne peuvent s'opérer que suivant la longueur du canal; en sorte qu'elles acquièrent dans ce sens la somme des intensités qu'elles auraient pu avoir dans toutes les directions, ce qui fait que la dernière lame d'air contenue dans l'extrémité évasée du porte-voix représente un corps sonore d'une grande étendue, agité de fortes vibrations suivant l'axe du porte-voix.

Le *cornet acoustique* est un instrument vulgaire dont les personnes qui ont l'oreille dure font usage pour augmenter l'intensité des sons qui se produisent autour d'eux, et les rendre perceptibles à leur organe peu sensible. Il consiste (*fig.* 115) en un petit tuyau conique dont le sommet étroit se place dans le conduit auditif externe, tandis que le pavillon se tourne vers le lieu d'où viennent les sons. La nature de la substance dont il est composé, et les formes droites, courbes ou même anguleuses, qu'on peut lui donner, n'influent en rien sur ses effets. Ils sont, au contraire, proportionnels au rapport qu'il y a entre la surface de sa large ouverture et la surface de sa petite extrémité. On a long-temps cherché à expliquer ses effets par une prétendue réflexion des *rayons sonores*. On peut les concevoir aisément

par les considérations suivantes : la couche d'air qui se trouve à l'embouchure du cornet acoustique est dans un état de vibration dont l'intensité dépend de la nature des sons et de la manière dont ils ont été transmis jusqu'à ce point. Mais cette couche d'air présente une grande étendue et se trouve formée d'un très-grand nombre de particules en vibration. Lorsque ces vibrations se propagent dans l'intérieur du cornet, elles se transmettent successivement à des couches d'air toujours moins étendues ou formées d'un plus petit nombre de particules, en sorte que la quantité de mouvement de mille particules, par exemple, finit par se transmettre à 10 particules seulement, si l'ouverture externe est 100 fois plus grande que l'interne. Il en résulte nécessairement une plus grande amplitude dans les oscillations des molécules situées à la petite extrémité du cornet, et par conséquent plus d'intensité dans les effets produits sur l'oreille.

Le *stéthoscope*, principalement destiné à transmettre des vibrations par l'intermède d'un corps solide, est cependant percé d'un canal dans toute sa longueur, et peut, à volonté, se terminer à l'une de ses extrémités, par une sorte d'entonnoir dont le sommet communique avec ce canal : il devient alors un véritable cornet acoustique, et peut être souvent remplacé avec avantage par un cornet acoustique ordinaire dont le pavillon est beaucoup plus large.

256. *Vitesse de la transmission.* Les observations les plus vulgaires prouvent que les sons produits dans un lieu éloigné ne parviennent à notre oreille qu'au bout d'un temps plus ou moins considérable. Si l'on regarde de loin un charpentier ou un bûcheron qui travaillent, on voit l'instant où le coup de hache est donné, et le bruit s'en fait entendre un moment plus tard. La lumière d'un coup de canon paraît long-temps avant que le bruit de l'explosion

parvienne jusqu'à nous; enfin, les éclats de la foudre ne parviennent souvent à notre oreille que plusieurs secondes après que l'éclair a frappé nos yeux, quoique les deux effets soient produits simultanément par l'étincelle électrique. Ces phénomènes dépendent de ce que la lumière marche si vite que, pour des distances ordinaires, le temps qu'elle met à les parcourir est tout à fait inappréciable, tandis que les vibrations de l'air qui constituent le son marchent avec beaucoup plus de lenteur.

On a profité de la facilité de cette comparaison pour mesurer la vitesse du son. Les commissaires de l'Académie ont fait, en 1738, de nombreuses expériences à l'aide de pièces d'artillerie situées à des distances connues, d'où l'on pouvait apercevoir la lumière et entendre le son. Ces expériences ont été, depuis peu, répétées par les membres du bureau des longitudes.

Les premiers expérimentateurs ont trouvé la vitesse du son de 337 mètres par seconde à la température de 6°. Les derniers l'ont trouvée de $340^m,89$ à $15°,9$, ce qui revient à $338^m,20$ en ramenant le résultat à ce qu'il aurait été à la température de 6°, coïncidence aussi exacte que le comportent de semblables expériences.

On a constaté que cette vitesse n'était point altérée par l'humidité de l'air, qu'elle s'accroissait un peu par l'élévation de température, qu'elle n'éprouvait aucune influence de la part du vent lorsque sa direction était perpendiculaire à la ligne de transmission des sons, mais qu'elle était augmentée ou diminuée précisément en proportion de la vitesse du vent, lorsque sa direction était favorable ou contraire à la marche du son.

On a cherché, par des méthodes mathématiques, quelle devait être la vitesse de la transmission du son dans l'air, étant données sa densité, sa force élastique et sa tempé-

rature. Newton et Lagrange ont trouvé que cette vitesse devrait être de 282 mètres seulement par seconde, tandis que l'expérience donne 337^{m}. De Laplace a trouvé la raison de cette différence, en considérant que la température de l'air s'élève dans la condensation et s'abaisse dans la raréfaction, d'une quantité très notable, en sorte que les forces élastiques qui transmettent le son ne sont pas, comme on l'avait supposé dans les premières formules, proportionnelles à la densité de l'air ou à la pression barométrique. En introduisant en effet dans les anciennes formules les données fournies par les expériences de MM. Clément et Désormes, qui indiquent pour l'air une élévation ou un abaissement de température de 1° pour une variation de volume de $\frac{1}{116}$ environ, on trouve théoriquement la vitesse du son, égale à $331^{m},97$, ce qui se rapproche déjà beaucoup plus des données de l'expérience. Il paraît même que cette faible différence est encore réduite de moitié, d'après des expériences récentes de MM. Gay-Lussac et Welter.

Cette élévation de la température dans la compression vibratoire n'est pas une simple supposition, car les vapeurs conduisent le son comme les gaz; mais les vapeurs se condensant à la moindre pression, la couche comprimée se condenserait et ne transmettrait aucun mouvement : or cette condensation ne peut être prévenue que par une élévation de température.

M. Biot a recherché la vitesse du son dans les tuyaux dont nous avons déjà parlé. Il a trouvé que le son parcourait deux fois 951 mètres ou 1902 mètres en 5″,58, c'est-à-dire environ 340 mètres par seconde; ce qui est à peu près d'accord avec les résultats précédens, puisqu'il est probable qu'il opérait à une température supérieure à 6°.

Ces recherches prouvent que, quoique la transmission du son soit beaucoup plus complète et plus énergique qu'à

l'air libre, sa vitesse reste la même; elles ont de plus fourni le moyen de constater que les sons aigus ou les sons graves, résultats des vibrations plus rapides ou plus lentes en elles-mêmes, se transmettent avec une vitesse parfaitement égale. Ce fait est, du reste, notoire, par cela seul qu'en écoutant un air de musique quelconque de près ou de loin, les rapports des différens sons entre eux ne présentent aucun changement; ce qui devrait arriver si les uns parvenaient plus vite que les autres à notre oreille.

Il faut en conclure aussi que le mouvement du son dans l'air est parfaitement uniforme, puisqu'il parcourt 1902 mètres dans un temps proportionnel à celui qu'il emploie pour franchir plusieurs lieues. Il n'éprouve donc aucun retardement dans sa marche, ce qui dépend sans doute de la parfaite élasticité de l'air.

Ce qu'il y a de plus extraordinaire dans la transmission du son, c'est qu'une multitude de vibrations diverses, produites par des corps sonores différens, peuvent être transmises à la fois vers un même point par l'air atmosphérique, sans se nuire et se troubler ni dans leur nature ni dans leur vitesse.

La faculté que nous avons d'entendre à la fois tous les sons produits par un orchestre nombreux en est la preuve. Mais il serait absolument impossible d'en donner la moindre explication. Il faut seulement remarquer que, quant à notre perception, les sons les plus forts nous empêchent d'entendre les plus faibles, ce qui s'explique par l'organisation même de l'oreille.

Les ondulations par lesquelles le son se propage dans l'air se répandent uniformément dans toutes les directions : néanmoins, on conçoit que le maximum de leur effet, sur un organe sensible, doit avoir lieu lorsque cet organe est situé perpendiculairement au rayon de la courbe de ces

ondulations. C'est pourquoi les sons paraissent d'autant plus forts que l'oreille est plus directement tournée vers le corps sonore; c'est pourquoi l'interposition d'un corps solide, et surtout d'un corps élastique, entre le corps sonore et l'oreille, diminue de beaucoup l'intensité du son; ce qui explique l'effet des croisées matelassées qui diminuent le bruit des voitures.

Comme nous avons vu les ondes qui se forment à la surface d'un liquide se reformer derrière un obstacle, et se propager par une ouverture qui devient leur centre, de même les ondes sonores pénètrent d'une masse d'air dans une autre par les points de communication, et le son semble alors venir de cette ouverture, parce qu'elle est effectivement le centre des ondes qui nous affectent. C'est ainsi qu'en prêtant l'oreille dans une cheminée, on croit entendre au sommet du tuyau les bruits extérieurs de la ville.

257. *De la Réflexion du son.* — Une foule d'expériences journalières prouvent que les vibrations sonores, transmises par l'air, peuvent être réfléchies par des surfaces solides, liquides et même gazeuses. Si l'on fait entendre des sons à une certaine distance d'un grand mur, ils se répètent un instant après, et semblent venir du mur lui-même, comme si une autre personne répondait de ce lieu. Ce phénomène, qui porte le nom d'*écho*, est très-commun, et quelquefois multiplié au point de reproduire un grand nombre de fois le même son. On le concevra facilement, si l'on considère que notre oreille peut apprécier aisément un intervalle de temps d'un dixième de seconde, et qu'en conséquence, si l'on se place à environ 17 mètres d'un mur, le son employant un dixième de seconde à aller jusqu'à ce mur et à en revenir jusqu'à l'oreille, on pourra distinguer le son réfléchi du son primitif. Si la distance est

plus grande, l'intervalle entre les deux sons sera plus considérable. Aussi trouve-t-on des échos qui peuvent répéter plusieurs syllabes ou plusieurs notes de musique, parce qu'on a le temps de les produire successivement avant l'époque du retour du premier son.

Si l'on conçoit des sons produits entre deux grands murs parallèles, le son pourra se répéter un grand nombre de fois en allant et revenant d'un mur à l'autre, jusqu'à ce qu'il devienne trop faible pour être perçu, ce qui constitue les *échos multiples*.

Il paraît que les lizières des forêts, la surface d'un étang, et même la surface d'un nuage, peuvent produire de semblables réflexions, aussi bien que des parois solides continues; ce qui donne lieu, dans la nature, à une multitude de phénomènes curieux, qui ont été souvent exagérés jusqu'au merveilleux.

En analysant mathématiquement les phénomènes du choc de l'onde sonore sur un plan, on démontre que sa réflexion doit s'opérer en faisant l'angle de réflexion égal à l'angle d'incidence, du moins quant aux rayons de ces ondes sonores, direction dans laquelle elles jouissent de leur maximum d'action; d'où il résulte que, pour les sons comme pour la lumière, on croit entendre dans la direction du rayon réfléchi, et au delà du corps réfléchissant. Il en résulte aussi que les surfaces courbes qui, lorsqu'elles sont blanches et polies, ont la propriété de former au devant d'elles des foyers de lumière, jouissent aussi de la propriété de concentrer les ondes sonores dans les mêmes points; en sorte que le son peut être très fort au foyer d'une courbe sphérique, quoiqu'il soit très faible dans les autres points de l'espace; et que le son produit à l'un des foyers d'une courbe ellipsoïde est très fort à l'autre foyer, quoiqu'il soit tout à fait inappréciable dans les autres points

de l'espace, de manière que deux interlocuteurs placés aux deux foyers d'une semblable courbe, peuvent s'entretenir à voix basse sans être entendus de ceux qui les entourent.

Ces propriétés expliquent, sans doute, plusieurs mystères de l'antiquité, dans lesquels une instruction, appartenant au petit nombre, pouvait facilement étonner le vulgaire. Elles ont laissé dans notre langage actuel une expression fausse qu'il est essentiel de relever. En effet, de ce que les ondes sonores sont susceptibles de réflexion, on en a conclu qu'il existait des *rayons sonores*, et l'on emploie à tout moment cette manière de peindre le phénomène de la transmission du son, ce qui fournit nécessairement une confusion, puisqu'on entend par rayon une suite de molécules qui marchent ou se transmettent leur mouvement exclusivement en ligne droite; tandis que le son se transmet et se répand uniformément dans toutes les directions. Ce qui prouve incontestablement une différence essentielle dans la transmission de la lumière et du son, c'est que la première est complètement interceptée par l'interposition d'un obstacle, tandis que le son est seulement affaibli.

S'il est vrai que les ondes sonores soient réfléchies au contact des corps, il n'en résulte pas moins, dans les corps mêmes qui en sont frappés, un ébranlement qui devient très sensible lorsque ces corps sont eux-mêmes susceptibles de vibrations. En conséquence, un corps sonore en repos, placé dans une masse d'air qui transmet actuellement des sons, ne tarde pas à vibrer lui-même, particulièrement s'il est susceptible, soit en s'agitant dans son entier, soit en se divisant par portions, de produire les mêmes vibrations dont l'air est agité. C'est ainsi qu'une corde tendue ne tarde pas à rendre un son, si l'on en approche une autre corde

en vibration. C'est ainsi que la voix d'un chanteur ou le son d'un instrument font frémir les vitres, qui, dans quelques cas, peuvent se briser par la trop grande étendue de ces agitations vibratoires.

Dans tout ce que nous venons de dire, nous avons considéré l'atmosphère qui environne les corps sonores comme le véhicule ou le moyen de transmission du son. Il est cependant essentiel de remarquer que la masse d'air elle-même devient souvent un véritable corps sonore, et se divise par des nœuds de vibration, dont les dispositions sont soumises à des lois, dont quelques-unes ont déjà été observées, comme on peut le voir dans les *Mémoires* de M. Savart. Ce qu'il y a de plus remarquable dans l'existence de ces nœuds, c'est qu'en se plaçant à l'endroit même où ils se forment, on entend à peine le son produit, quoique l'on soit fort près du corps sonore; tandis qu'on perçoit le son dans toute sa force si l'oreille est placée dans l'un des ventres de vibration, fût-elle alors beaucoup plus éloignée du corps sonore. M. Savart a découvert ces faits au moyen des vibrations que l'air communique à une petite membrane tendue, et qui deviennent sensibles en la couvrant de sable.

DE LA COMPARAISON DES SONS.

258. Il paraît, au premier examen, que tous les corps sonores doivent être susceptibles de produire, et l'air capable de transmettre toutes sortes de vibrations; mais il existe dans notre organe de l'ouïe un singulier rapport avec certaines vitesses des vibrations, qui fait que nous sommes capables d'éprouver des impressions constantes, de certaines de ces vitesses, et de les comparer les unes aux autres, de manière à être frappés agréablement de cer-

tains rapports, et blessés par d'autres. Si, par exemple, un corps sonore fait 100 vibrations par seconde, et qu'un autre corps en fasse 200, les deux sons produits simultanément ou successivement affecteront notre oreille d'une manière analogue et satisfaisante; tandis que si l'un des corps faisait 100 vibrations, et l'autre 127, par exemple, la simultanéité de ces deux sons aurait quelque chose de choquant, même de pénible pour notre oreille. Il existe un grand nombre d'autres rapports numériques entre les différentes vitesses de vibration, qui produisent des effets plus ou moins analogues au premier exemple cité; et la série des sons dont les vitesses se trouveront combinées suivant ces rapports, produit ce qu'on appelle une *échelle musicale.*

Dans la comparaison des sons, on nomme *grave* celui dont les vibrations sont plus lentes; on nomme *aigu* celui dont les vibrations sont plus rapides. On nomme *intervalle* le rapport du nombre de vibrations d'un son à un autre. On nomme *accord* l'effet simultané de plusieurs sons.

Le son est toujours le même, quel que soit le corps qui le produise, lorsque le nombre des vibrations est le même.

Lorsqu'un son est le produit d'un nombre de vibrations double de celui qui en produit un autre, on le nomme l'octave de celui-ci; et, en doublant toujours les vitesses, on obtient la double, la triple octave, etc. Tous ces sons se ressemblent tellement les uns aux autres, qu'on les désigne tous par le même signe.

L'échelle musicale se compose de sons interposés entre deux sons, à l'octave l'un de l'autre. Il existe en Europe trois échelles musicales: la *diatonique*, la *chromatique* et l'*enharmonique*. La première est composée de 8 sons, la seconde de 13, et la troisième de 24. Nous nous contenterons de donner une idée de la première.

Si l'on suppose une corde tendue, rendant un son quelconque, et que l'on représente par 1 le nombre de vibrations qu'elle peut faire dans un temps donné, on pourra la diviser successivement, de manière que les nombres de vibrations que produiront ces parties, soient exprimés par $1, \frac{9}{8}, \frac{5}{4}, \frac{4}{3}, \frac{3}{2}, \frac{5}{3}, \frac{15}{8}, 2$.

On obtient ces différentes vitesses en prenant des longueurs de la même corde directement inverses; ainsi, la vitesse $\frac{9}{8}$ est obtenue par les $\frac{8}{9}$ de la corde, et ainsi de suite (161).

La série des sons produits par de semblables vitesses de vibration est représentée dans notre langage musical par les mots *ut*, *ré*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*, *ut*. Le dernier *ut* sera l'octave aiguë du premier.

En cherchant les rapports de ces différentes vitesses entre elles, on trouve que le rapport de vitesse de *ut* à *ré* est de 8 à 9, celui de *ré* à *mi*, de 9 à 10; celui de *mi* à *fa*, de 15 à 16; celui de *fa* à *sol*, de 8 à 9; celui de *sol* à *la*, de 9 à 10; celui de *la* à *si*, de 8 à 9; celui de *si* à *ut*, de 15 à 16.

En considérant cette série de sons qui forment ce que l'on appelle la gamme naturelle, on peut apercevoir qu'il y a dans cette série de rapports, entre les nombres de vibrations, trois rapports différens les uns des autres : celui de 8 à 9 répond à *ut* et *ré*, à *fa* et *sol* et à *la* et *si*; c'est le plus grand des trois rapports; il constitue ce que l'on nomme un ton ou un intervalle *majeur*; le rapport de 9 à 10, qui est un peu plus petit, répond à *ré* et *mi*, et à *sol* et *la*; il forme des tons que l'on nomme *mineurs*. Enfin, le rapport de 15 à 16, qui répond à *mi* et *fa* et à *si* et *ut*, est presque moitié du premier; il forme ce que l'on nomme un demi-ton. Il y a donc dans notre gamme trois tons majeurs, deux tons mineurs et deux demi-tons.

Des circonstances analogues président à la formation des autres intervalles, que l'on nomme *tierce*, *quarte*, *quinte*, etc., qui sont composés de deux, de trois ou de quatre intervalles simples, majeurs, mineurs ou demi-ton : enfin, un son quelconque peut être élevé ou abaissé d'un demi-ton, ce que l'on nomme *dièze* ou *bémol*, et ce que l'on indique par les signes ✕ ou ♭.

Nous omettons à dessein tous les détails de la théorie musicale et celle des tempéramens, que l'on trouvera suffisamment développés dans la Grande Physique de M. Biot.

DE L'ORGANE DE L'OUIE.

259. Il n'y a rien de plus admirable dans l'étude des sciences naturelles que les rapports d'une exactitude mathématique qui existent entre nos organes et les phénomènes physiques qui nous entourent : l'oreille en offre un exemple frappant; car non seulement elle est, en général, disposée pour recevoir l'impression des sons, mais elle contient une suite de détails minutieux de construction, qui n'en sont pas moins constans, et qui sont en relation avec toutes les propriétés des corps sonores. Ces relations sont tellement positives, pour ce que nous connaissons, qu'il est évident que les parties de l'oreille, dont nous ignorons l'usage, sont relatives à des propriétés du son que nous ne connaissons pas encore, en sorte que chaque découverte en acoustique éclaircit l'usage d'une portion de notre organe, comme on a vu les recherches de M. Savart apprendre la raison de la tension variable de la membrane du tambour.

Si quelque chose doit confondre la sagesse humaine et humilier la vanité scientifique, c'est, sans doute, cette remarque que, depuis le commencement du monde, il existe

une machine parfaite pour la perception des sons, et qu'après au moins deux mille ans de travaux nous ne soyons pas encore parvenus à la comprendre.

L'organe de l'ouïe est composé, dans l'homme, de deux parties distinctes : l'une qui paraît être le siège particulier de la perception, et l'autre qui semble destinée à la préparer, en quelque sorte, pour la rendre plus parfaite. Cette double disposition est commune à tous nos organes des sens : ainsi, les extrémités du nerf acoustique, ramollies et plongées dans un liquide, sont l'organe essentiel de l'ouïe, et tous les autres organes sont accessoires. Ce qui prouve cette essentialité, c'est que, dans les animaux des classes inférieures, on voit successivement disparaître tout ce qui est accessoire, et que tout l'organe se trouve souvent réduit à une petite cavité pleine d'un liquide ou d'une pulpe dans laquelle aboutit le nerf acoustique, et qui est séparée de l'air extérieur par une simple membrane.

L'oreille de l'homme présente, de dehors en dedans, la série des dispositions suivantes :

Un pavillon, formé de substance cartilagineuse, et au centre duquel est une cavité plus profonde, qu'on nomme la *conque ;* un conduit, d'abord cartilagineux, ensuite osseux, qui pénètre dans l'intérieur de l'os temporal par une direction oblique, en se rétrécissant et se contournant un peu pour se terminer à une membrane mince qui le sépare de la caisse du tambour et du reste de l'oreille ; derrière la membrane du tympan, une cavité qui porte le même nom, et qui communique par un conduit nommé *trompe d'Eustache*, avec l'arrière-bouche. Dans cette caisse, quatre petits os, le marteau, l'enclume, l'os lenticulaire et l'étrier, s'articulant entre eux, pourvus de petits muscles, et formant une espèce de chaîne ; le manche du marteau se trouvant attaché à la membrane du tympan, et la base

de l'étrier adhérant à une membrane qui ferme une ouverture nommée *fenêtre ovale*, laquelle sépare la caisse du tympan du labyrinthe. Dans la caisse du tympan, une autre ouverture nommée *fenêtre ronde*, fermée aussi par une membrane, qui sépare cette caisse d'une autre petite cavité nommée *vestibule*. Enfin, au delà des deux membranes de la fenêtre ronde et de la fenêtre ovale, des cavités sinueuses creusées dans la portion la plus dure de l'os des tempes, et constituant ce qu'on nomme le *labyrinthe*, qui se compose lui-même, 1° du vestibule ; 2° du limaçon, sorte de spirale dont la cavité est divisée en deux portions, par une lame moitié osseuse et moitié membraneuse, dont la largeur va en diminuant progressivement de la base au sommet du limaçon, qui semble présenter des dimensions constantes, et qui est formée de petites fibres transversales, analogues à ces lames de verre ou à ces tiges élastiques que l'on range les unes à côté des autres pour leur faire produire une succession de sons; 3° de trois canaux, que l'on nomme *demi-circulaires*, à cause de leur forme, et qui sont presque remplis par de petits corps mous terminés par des ampoules, et dont on ignore l'usage. Ce labyrinthe est le lieu de la terminaison du nerf acoustique, et toutes ses cavités sont remplies d'un fluide tellement essentiel à l'audition, que la déchirure de l'une des membranes qui ferment les fenêtres ronde et ovale produit constamment la surdité; tandis que la membrane du tambour et les osselets, l'étrier excepté, peuvent être détruits et l'audition subsister. Il est cependant probable qu'elle est alors moins parfaite.

Si nous cherchons maintenant quels peuvent être les usages réciproques de chacune des parties que nous venons d'indiquer, quoiqu'il nous manque une grande partie des connaissances acoustiques qui seraient nécessaires pour en

juger, nous pouvons cependant établir les présomptions suivantes :

Le pavillon de l'oreille et le conduit auditif ont évidemment pour usage de rendre plus forte l'impression des sons sur l'oreille. Lorsque le conduit est obstrué par des matières étrangères, l'audition est presque détruite ; lorsqu'on agrandit, en quelque sorte, le pavillon de l'oreille en formant une concavité avec la main, les sons paraissent prendre plus d'intensité ; enfin, les animaux timides ont un pavillon conique très mobile, et dont l'ouverture se dirige vers le côté d'où peuvent venir les sons qu'ils ont intérêt à apprécier. Nous ne dirons pas, comme on le faisait autrefois, que le pavillon de l'oreille réfléchit les rayons sonores sur la membrane du tympan ; car il suffirait de remarquer que ce pavillon a une forme généralement concave, pour être assuré que toutes les réflexions doivent se faire en dehors de ce pavillon, puisque c'est une propriété des surfaces concaves d'avoir leur foyer au devant d'elles. Nous appliquerons ici ce que nous avons dit du cornet acoustique (254), qui n'est qu'un agrandissement artificiel du pavillon de l'oreille.

La membrane du tympan, traversée par un filet nerveux, et susceptible de plus ou moins de tension par l'action des muscles du marteau, ressemble beaucoup à un corps vibrant, qui serait susceptible de se mettre à l'unisson des vibrations de l'air. Aussi l'a-t-on d'abord considéré comme tel. Mais M. Savart a prouvé qu'une membrane indéfiniment tendue pouvait entrer en vibration sous l'influence de tous les sons possibles, parce qu'elle se divise en mille manières différentes pour se conformer aux différentes vitesses des vibrations. Les différens degrés de tension de la membrane seraient donc superflus. Mais ils paraissent avoir un autre usage très important. En effet

une membrane faiblement tendue obéit aux plus légères impulsions, et sans fortes émotions prend une grande amplitude de mouvemens; et au contraire une membrane très tendue s'émeut plus difficilement et n'exécute que de petits mouvemens. Ainsi, les tensions diverses de la membrane du tympan ont pour effet, 1° de la rendre propre à s'agiter sous les plus faibles impulsions; 2° de borner l'amplitude de ses mouvemens, qui blesseraient la délicatesse de l'organe de perception.

La caisse du tympan contient de l'air, qui paraît indispensable à la transmission des sons, et qui est, en effet, une condition nécesaire à la liberté des vibrations de la membrane du tympan. Cet air, contenu dans une cavité dont les parois sont lubrifiées par une humeur animale, se serait promptement altéré, ou même aurait été absorbé, si la caisse du tympan n'avait point eu de communication à l'extérieur. Cette communication a lieu par la trompe d'Eustache; mais ce canal long, étroit et formé principalement de parties molles, tout en permettant l'accès de l'air, ne produit pas de déperdition sensible dans l'intensité des vibrations de l'air intérieur.

La chaîne des osselets de l'ouïe, fixée d'une part à la membrane du tympan, appliquée de l'autre sur la membrane qui bouche la fenêtre ovale, et susceptible de tensions variables par l'action des muscles propres de ces petits os, paraît éminemment propre à transmettre les vibrations de la membrane externe au liquide contenu dans le labyrinthe, et, par conséquent, aux filets nerveux qui plongent dans ce liquide. Mais nous ignorons encore quel rapport il peut y avoir entre la structure parfaitement régulière et constante de ces petits os, et la transmission des différentes espèces de sons.

Il est très probable que la complication de l'appareil que

nous venons de décrire est plutôt relative à la précision parfaite de l'appréciation des sons et aux nuances les plus délicates de l'audition, qu'au phénomène principal, puisque, d'une part, nous pouvons entendre et même juger à peu près les sons par la transmission directe à travers les os du crâne ou les dents, et que, d'une autre part, la membrane du tympan et les osselets étant détruits, nous sommes encore susceptibles de percevoir et de distinguer les sons. Il paraît aussi que les petits muscles des osselets de l'ouïe sont parfaitement liés à la perfection morale qui distingue l'homme des animaux; puisque les mammifères, qui ont, du reste, l'organe de l'ouïe construit comme celui de l'homme, manquent de ces sortes de muscles, qui, chez eux, sont remplacés par des ligamens.

Nous avons remarqué, en parlant des vibrations des corps solides, que lorsqu'elles n'excédaient pas le nombre de 32 par seconde, elles ne pouvaient produire ce qu'on nomme le *son*. Une autre observation non moins remarquable de M. Wollaston, c'est que les sons très aigus finissent par cesser d'être perceptibles pour l'oreille, et même que cette faculté est variable suivant les individus; en sorte que, si l'on fait vibrer devant plusieurs personnes de petites lames élastiques de plus en plus courtes, il arrivera un moment où le son ne sera plus entendu par quelques unes de ces personnes, tandis qu'il le sera encore par les autres. De ces deux observations il faut conclure qu'il y a dans notre oreille toutes les conditions physiques de la perception des sons entre deux limites opposées au delà desquelles les sons n'existent plus pour nous : cette condition était indispensable à l'usage même de cet organe; car si nous pouvions percevoir tous les sons qui se produisent dans l'univers, nous serions sans cesse étourdis de leur multitude et nous ne pourrions en distinguer aucun.

DE L'ORGANE DE LA VOIX.

259. Un des phénomènes les plus remarquables dans les animaux, est sans doute la faculté de produire des sons en mettant l'air en vibration par des moyens quelconques. Mais il existe des animaux qui produisent ces sons en frottant des parties dures les unes contre les autres, et l'on a réservé l'expression de *voix* pour le cas où les vibrations sont produites par le mouvement imprimé à une colonne d'air : d'où il résulte que les animaux qui ont des poumons sont les seuls qui aient une voix proprement dite.

Lorsque les physiologistes ont cherché à se rendre compte du phénomène de la voix dans l'homme, ils ont presque toujours manqué des connaissances physiques suffisantes pour en faire d'heureuses applications, et peut-être aussi que l'acoustique elle-même n'était pas assez avancée pour fournir des explications convenables.

Dans l'état actuel des connaissances, on doit dire que, dans l'homme, la voix est produite par un instrument à anche libre. En effet, lorsque la voix doit se produire, l'air est d'abord accumulé dans le poumon par une inspiration préliminaire; il est ensuite pressé par les muscles expirateurs, et s'échappe par un canal nommé *trachée-artère*. Ce canal est formé d'anneaux cartilagineux incomplets, réunis par des parties membraneuses; il est susceptible d'alongement et de raccourcissement passifs, par les différentes situations de la tête et par l'action des muscles qui élèvent le larynx. Ce canal est terminé par une cavité qui lui forme une espèce de tête, et que l'on nomme le *larynx*: celui-ci est formé de plusieurs pièces cartilagineuses, propres à maintenir l'étendue de sa cavité et à céder à l'action d'un assez grand nombre de muscles propres. Ce qu'il y a de plus remarquable à cette extrémité du

grand canal aérien, c'est son ouverture, qui se présente derrière la base de la langue, qui transmet l'air dans les cavités de la bouche ou des fosses nasales, et qu'on nomme *la glotte*. Cette ouverture est une espèce de fente comprise entre deux replis musculo-membraneux qui en forment les lèvres. Ces replis peuvent être plus ou moins tendus et rapprochés l'un de l'autre; ils peuvent même se toucher dans une grande partie de leur étendue, ce qui rétrécit beaucoup l'ouverture de la glotte et diminue la longueur de la partie libre des replis : ce sont principalement les cartilages aryténoïdes et leurs muscles qui produisent ces modifications. Au-dessus et au devant de cette ouverture de la glotte, se trouve une plaque cartilagino-membraneuse, onciforme, que l'on nomme *l'épiglotte* : elle est mobile, peut s'approcher plus ou moins de l'ouverture de la glotte et même s'y appliquer exactement.

Du reste, l'air sorti de la glotte peut se porter exclusivement dans la cavité de la bouche, lorsque le voile du palais est élevé et ferme l'ouverture des forces nasales. Cette cavité de la bouche est très variable : elle forme une espèce d'entonnoir lorsque la bouche est ouverte, et peut, au contraire, n'offrir qu'une issue très étroite à l'air lorsque les lèvres sont plus ou moins rapprochées. Le voile du palais, lorsqu'il n'est point élevé, permet le passage simultané de l'air par la cavité de la bouche et par celle des fosses nasales.

D'après cette description sommaire, on voit que le canal de la trachée-artère peut être considéré comme le porte-vent d'un tuyau à anche, dont on sait que les variétés de longueur peuvent modifier les sons, et que les bords de la glotte peuvent être considérés comme deux anches libres dont les variétés de longueur et d'élasticité modifient essentiellement les sons rendus par un semblable instrument. Il

est vrai que, dans les modifications des anches artificielles, il devient souvent impossible de conserver la justesse des sons; mais on sait aussi que quelques feuillets de papier, placés au dessus de l'ouverture du tuyau à anche, facilitent beaucoup la production des sons; et c'est l'usage que paraît avoir l'épiglotte, qui s'abaisse plus ou moins vers l'ouverture de la glotte. Enfin, l'on sait que, dans l'instrument à anche libre, le tuyau qui donne issue à l'air n'influe pas beaucoup sur le son qui est produit, mais modifie singulièrement son timbre et sa transmission au dehors. C'est de la même manière que la cavité de la bouche, plus ou moins ouverte ou fermée, modifie les sons produits à l'ouverture de la glotte; c'est par la même raison que les sons qui se transmettent à la fois par la bouche et par les fosses nasales, prennent ce timbre particulier qui est si remarquable dans les personnes dont le voile du palais a été accidentellement détruit ou perforé.

On aperçoit, dans tout ce que nous venons de dire, la possibilité de comprendre la plupart des modifications de la voix dans ce que l'on nomme le *chant*. Il faut cependant convenir que le volume de la colonne d'air, la largeur de l'ouverture et l'étendue des parties vibrantes, ne paraissent point en proportion avec la gravité et la plénitude des sons que la voix humaine peut produire, puisqu'elle est en général susceptible de s'étendre dans deux octaves, et qu'elle peut descendre jusqu'au *sol* d'une octave dont l'*ut* serait le son fondamental d'un tuyau de quatre pieds bouché. Il est probable que le genre de souplesse particulier aux organes vivans se prête à des vibrations très lentes, et que la précision des rapports nouveaux qui s'établissent à chaque instant entre les différentes parties de l'instrument facilite beaucoup la production de toute espèce de sons intermédiaires. M. Savart a d'ailleurs

constaté qu'un tuyau court à parois flexibles donne des sons beaucoup plus graves qu'avec des parois rigides.

On a lieu d'être surpris que les physiologistes aient pu considérer un instant la voix comme produite par un instrument à corde.

On conçoit aisément comment la petitesse de la glotte produit une voix plus haute chez les enfans et chez les femmes, comment la voix devient grave à l'âge de la puberté chez les hommes, lorsque le larynx acquiert des dimensions presque doubles; comment une ouverture accidentelle de la trachée-artère ou du larynx au dessous de la glotte rend la production de la voix impossible; et enfin comment les vices de conformation, ou les ouvertures accidentelles situées au dessus de la glotte, altèrent la voix sans s'opposer à sa production.

Les différentes classes d'animaux présentent, sous le rapport de la production de la voix, un très grand nombre de différences importantes dans le détail desquelles il ne nous convient pas d'entrer, mais qui seront facilement conçues d'après les principes que nous avons établis.

La production de cette modification de la voix, que l'on nomme *parole*, et qui semble n'appartenir naturellement qu'à l'espèce humaine, dépend de combinaisons très complexes de la voix proprement dite avec la prononciation, qui modifie d'une manière toute particulière l'émission des sons au dehors par les effets combinés de l'ouverture de la bouche, de l'action des lèvres et de celle de la langue. Nous laissons aux physiologistes le soin de développer cette partie intéressante d'une fonction dont nous avons établi les bases principales sur les lois reconnues des phénomènes physiques.

FIN DU PREMIER VOLUME.

TABLE ANALYTIQUE

DES MATIÈRES.

A.

B.

C.

D.

E.

F.

H.

I.

O.

P.

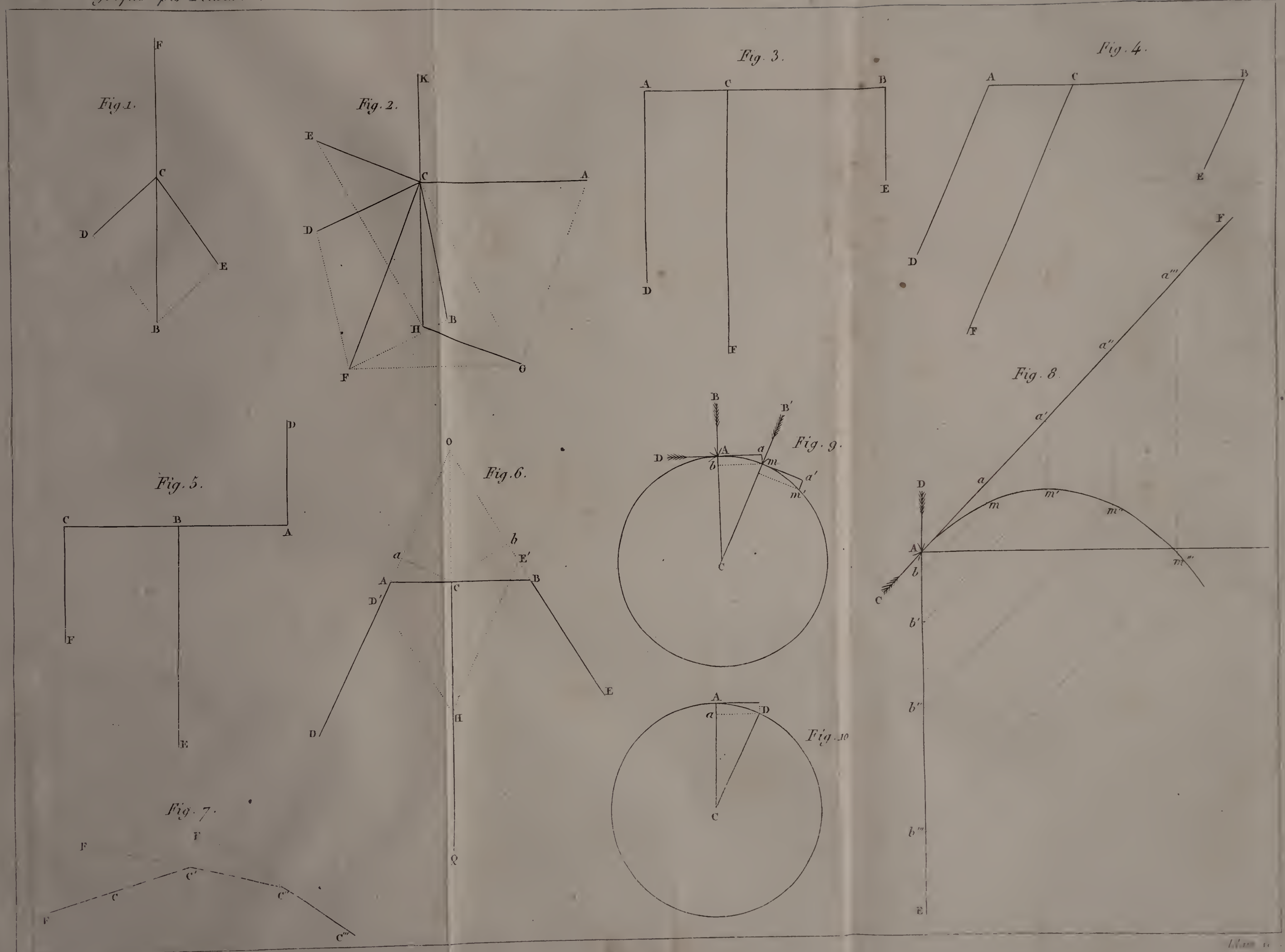
R.

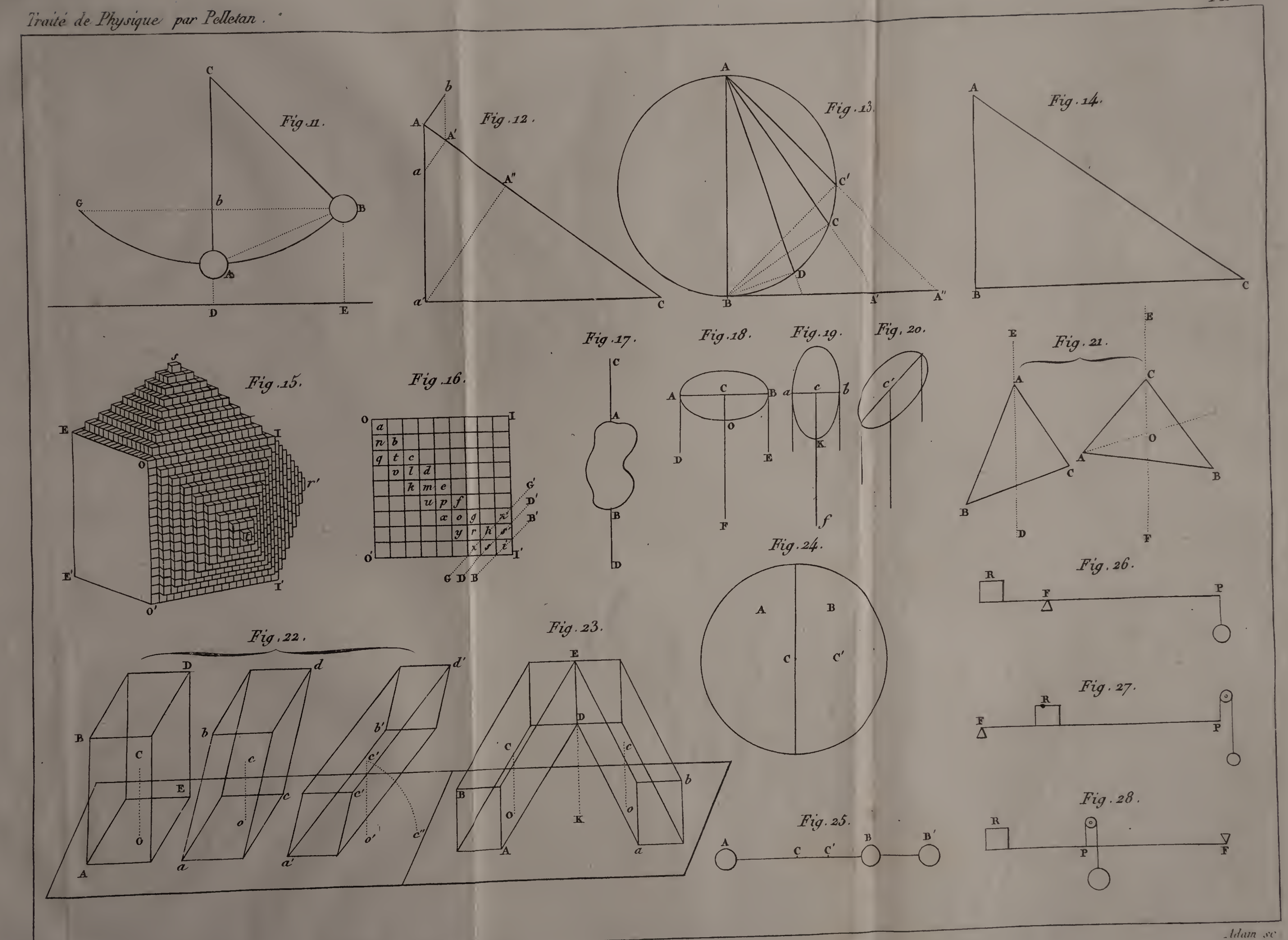
S.

T.

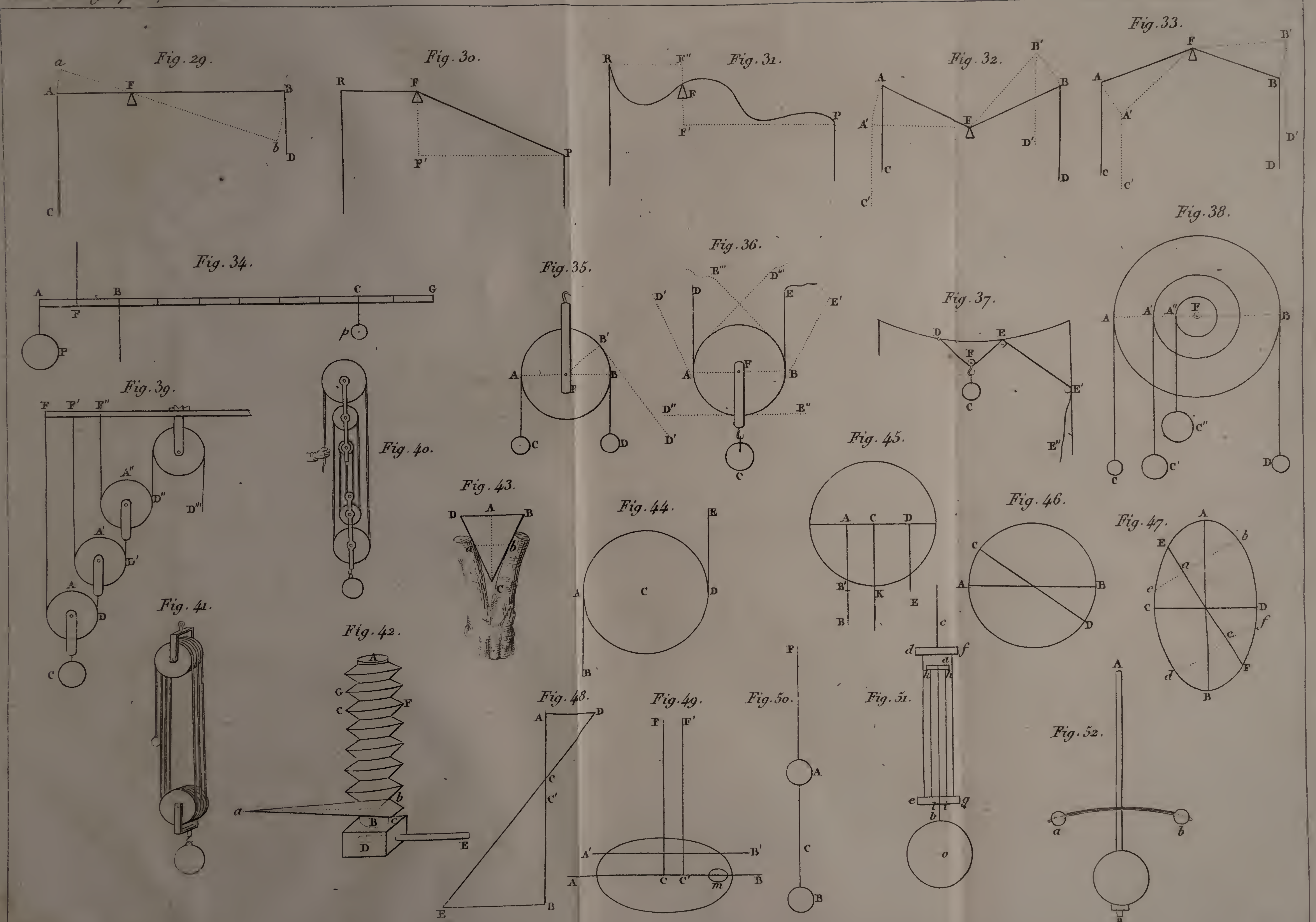
V.

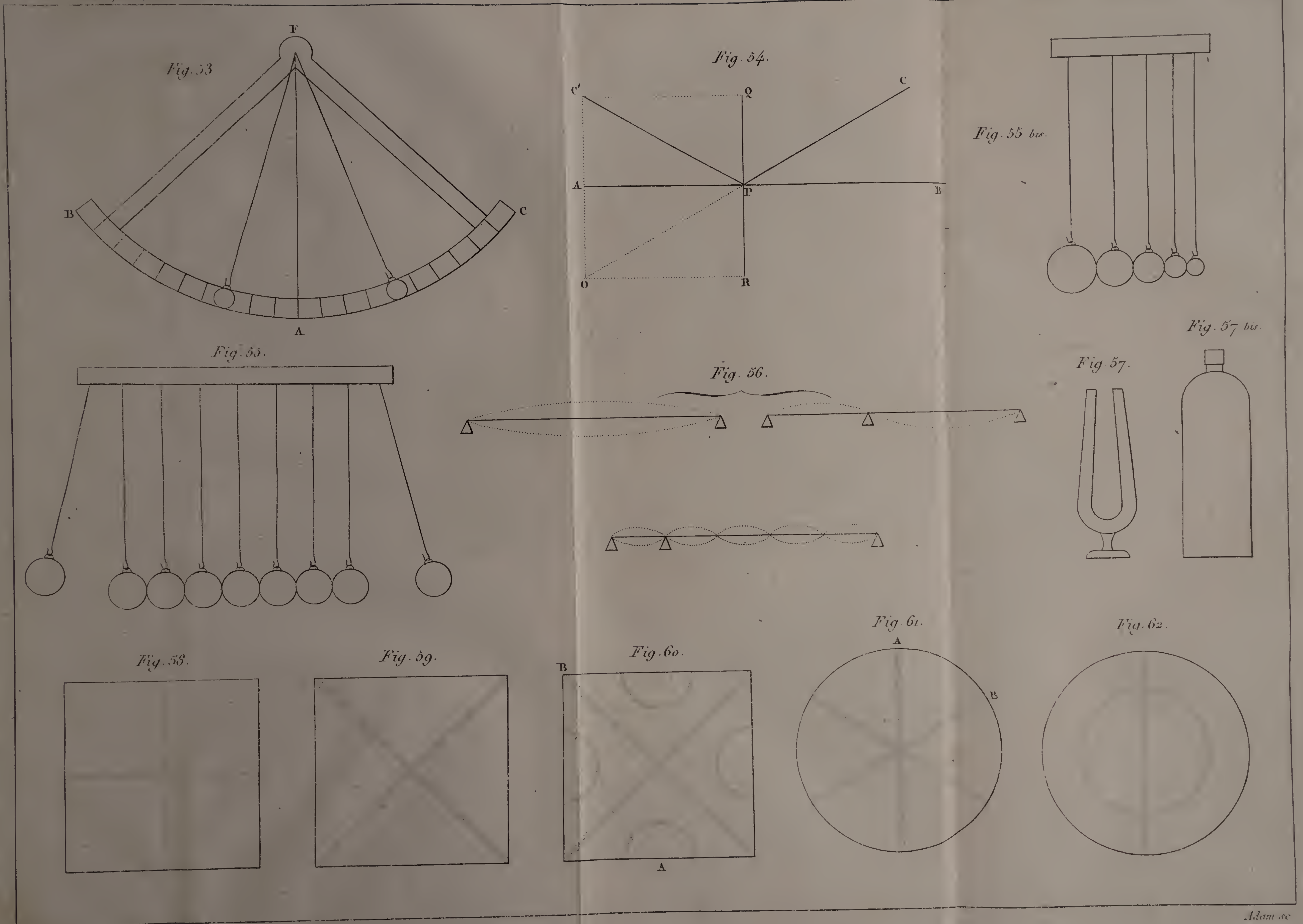
FIN DE LA TABLE ANALYTIQUE DU PREMIER VOLUME.

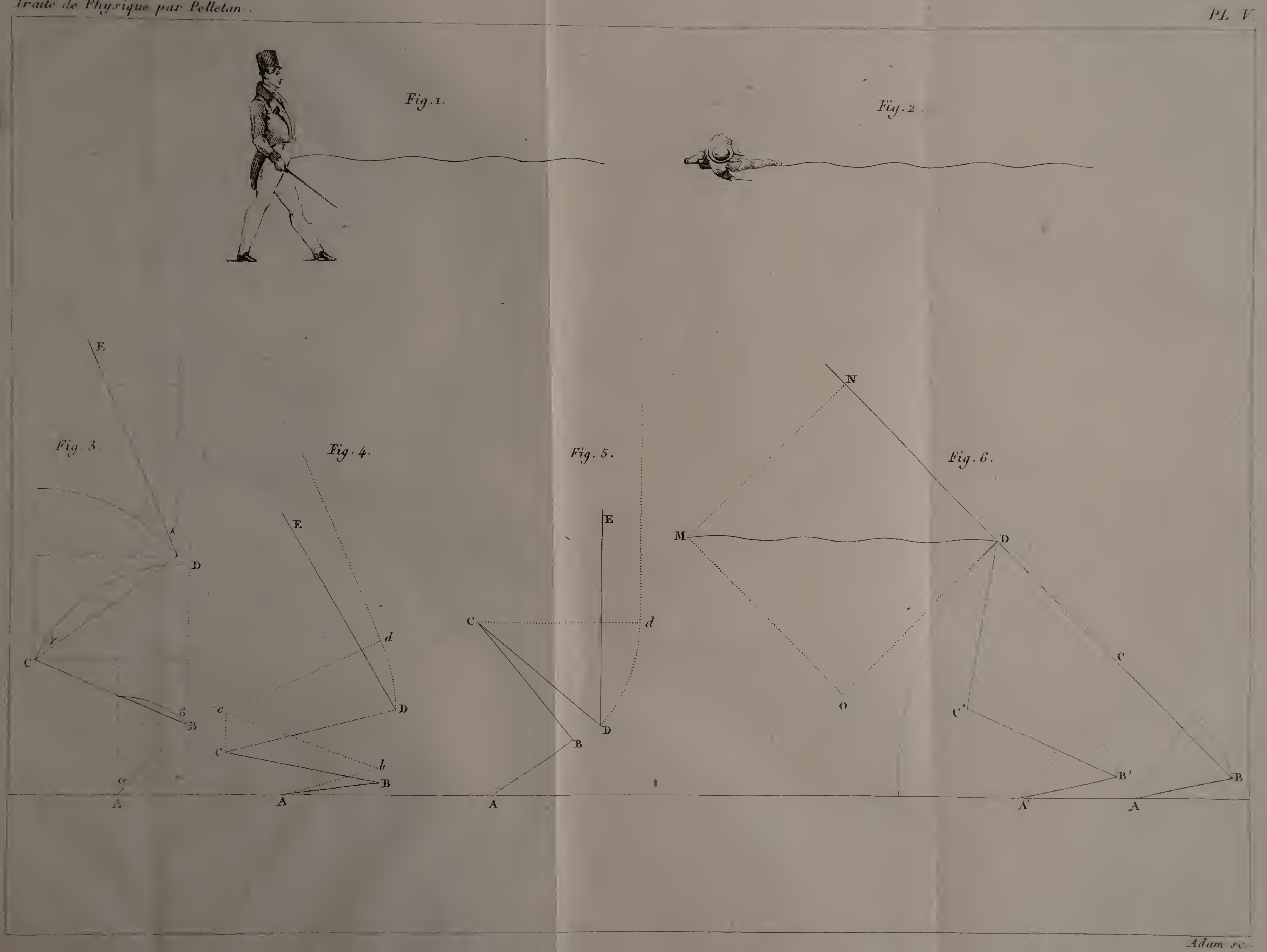

Fig. 1.
Fig. 2.
Fig. 3.
Fig. 4.
Fig. 5.
Fig. 6.
Fig. 7.
Fig. 8.
Fig. 9.
Fig. 10.


Fig. 11.
Fig. 12.
Fig. 13.
Fig. 14.
Fig. 15.
Fig. 16.
Fig. 17.
Fig. 18.
Fig. 19.
Fig. 20.
Fig. 21.
Fig. 22.
Fig. 23.
Fig. 24.
Fig. 25.
Fig. 26.
Fig. 27.
Fig. 28.

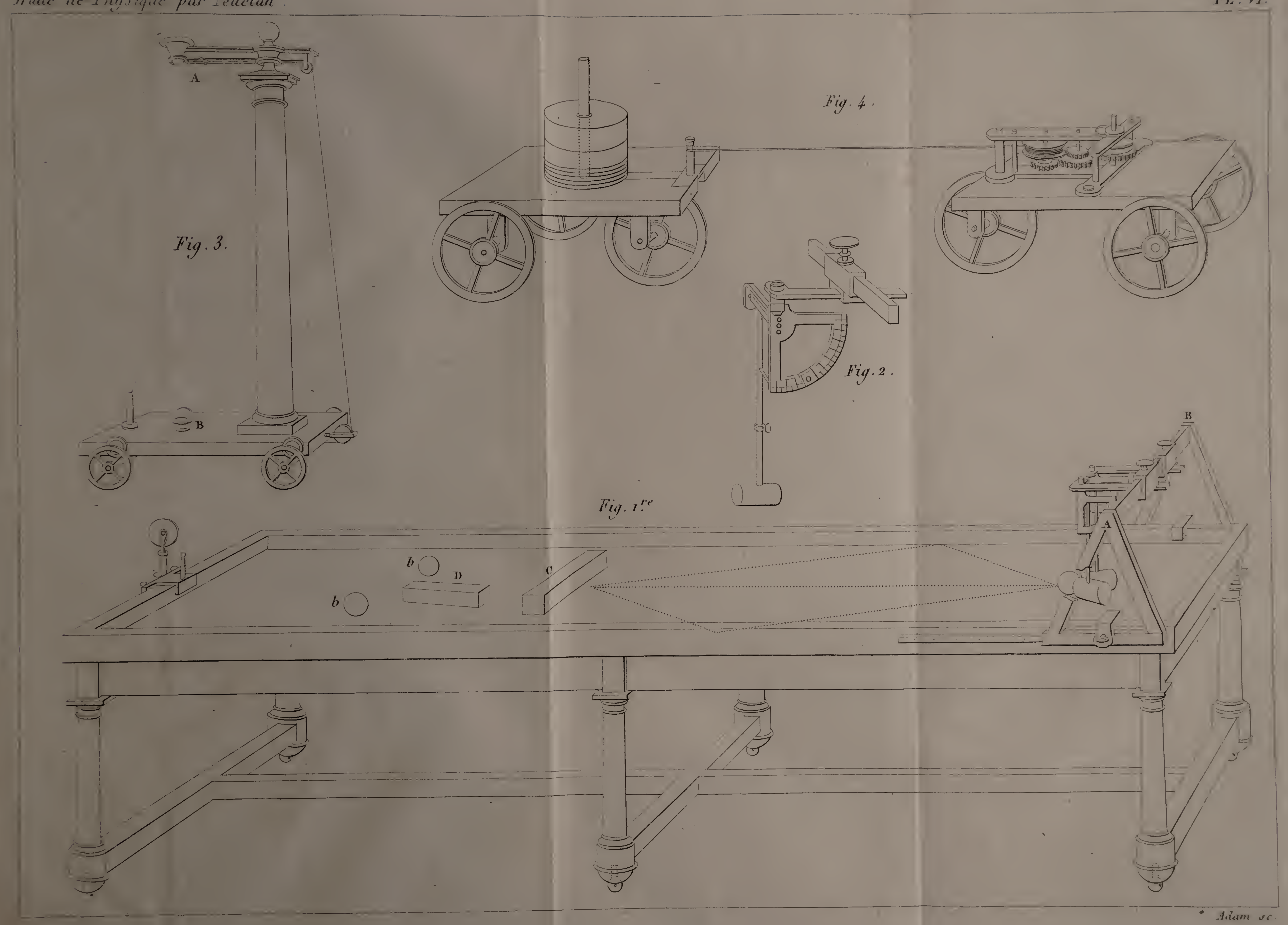
Adam sc.


Fig. 29.
Fig. 30.
Fig. 31.
Fig. 32.
Fig. 33.
Fig. 34.
Fig. 35.
Fig. 36.
Fig. 37.
Fig. 38.
Fig. 39.
Fig. 40.
Fig. 41.
Fig. 42.
Fig. 43.
Fig. 44.
Fig. 45.
Fig. 46.
Fig. 47.
Fig. 48.
Fig. 49.
Fig. 50.
Fig. 51.
Fig. 52.

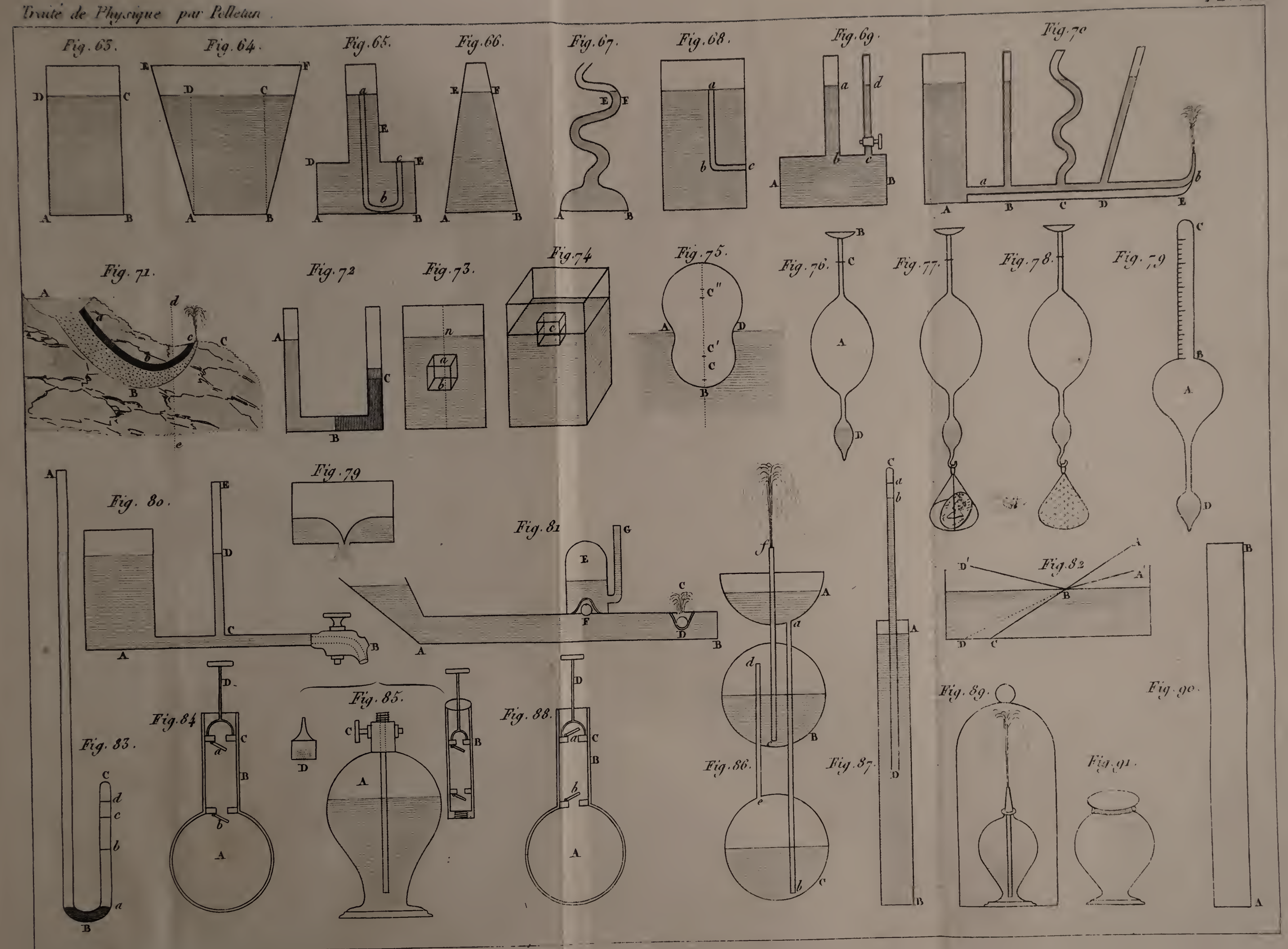

Fig. 53
F
B
C
A
Fig. 54.
C'
Q
C
A
P
B
O
R
Fig. 55 bis.
Fig. 55.
Fig. 56.
Fig. 57 bis.
Fig. 57.
Fig. 58.
Fig. 59.
Fig. 60.
B
A
Fig. 61.
A
B
Fig. 62.



Adam sc.



Adam sc.


Fig. 63.
Fig. 64.
Fig. 65.
Fig. 66.
Fig. 67.
Fig. 68.
Fig. 69.
Fig. 70
Fig. 71.
Fig. 72
Fig. 73.
Fig. 74
Fig. 75.
Fig. 76.
Fig. 77.
Fig. 78.
Fig. 79
Fig. 80.
Fig. 79
Fig. 81
Fig. 82
Fig. 83.
Fig. 84
Fig. 85.
Fig. 88.
Fig. 86.
Fig. 87.
Fig. 89.
Fig. 90.
Fig. 91.

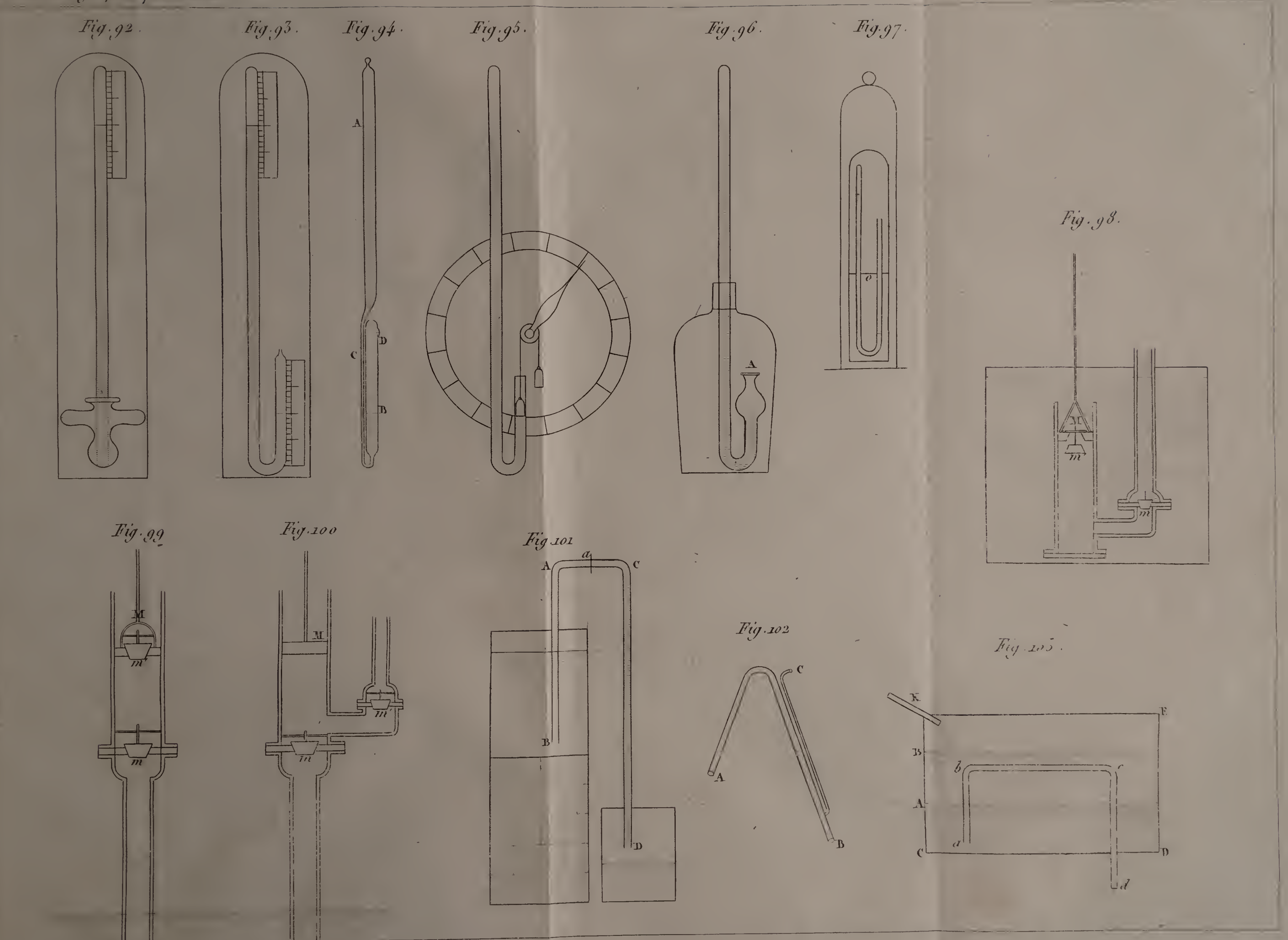
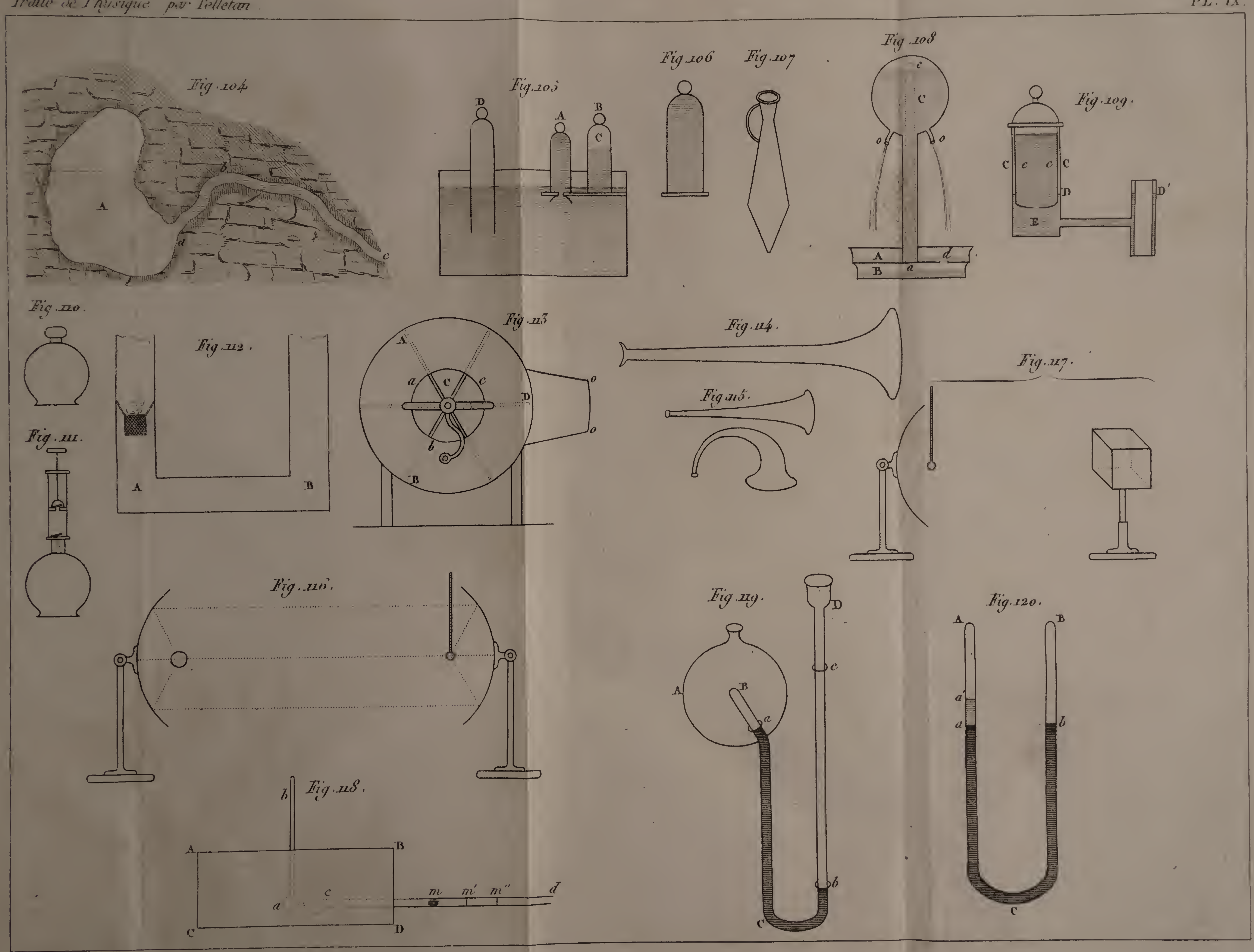


Fig. 92.
Fig. 93.
Fig. 94.
A
D
C
B
Fig. 95.
Fig. 96.
A
Fig. 97.
e
Fig. 98.
M
m
Fig. 99
M
m
m
Fig. 100
M
m
m
Fig. 101
a
A
C
B
D
Fig. 102
C
A
B
K
F
B
b
c
A
a
C
D
d


Fig. 104.
Fig. 105.
Fig. 106
Fig. 107
Fig. 108
Fig. 109.
Fig. 110.
Fig. 111.
Fig. 112.
Fig. 113
Fig. 114.
Fig. 115.
Fig. 116.
Fig. 117.
Fig. 118.
Fig. 119.
Fig. 120.

